

PvcomB – Thin Film Workshop in Berlin

Vom 19. bis zum 21. April 2010 fand in Berlin ein internationaler Workshop über CIGS-Solarzellentechnologie statt. Referenten aus Forschung und Industrie präsentierten neue technologische Erkenntnisse und Entwicklungen bei der Herstellung von Solarzellen auf der Basis von Kupfer-Indium-Gallium-Selenid (CIGS). Viele Hersteller aus Deutschland waren vertreten, die internationalen Gäste fehlten leider wegen des aschebedingten Luftverkehrschaos.

Die Herstellung von CIGS-Solarzellenabsorbern ist ein komplexer Prozeß, sowohl als PVD-Co-Verdampfung als auch mit serieller Herstellung der Einzelschichten und anschließender Temperung. Oft gibt es Schwankungen in der Zusammensetzung des Absorbers über der Schichtdicke oder lokale Inhomogenitäten. Solche Schwankungen aufzuspüren und zu quantifizieren ist eine wichtige Analysenmöglichkeit in der Entwicklung und in der Fertigung von Dünnschichtabsorbern. Prof. Birgit Kanngießner von der Technischen Universität Berlin zeigte in ihrem Vortrag, wie diese Analysen mit Hilfe von Röntgenstrahlen durchgeführt werden können. Interessant ist beispielsweise der jeweilige Anteil von Indium und Gallium in verschiedenen Abständen vom Substrat. Über die Änderung der Einstrahlenergie oder des Einfallwinkels können gezielt Informationen aus verschiedenen Tiefen der Schicht gewonnen und damit ein Profil gezeichnet werden.

Wie die Schichtdicken und die Morphologie von Schichtstapeln mit Hilfe von Laserreflektometrie ver-

messungen werden kann, zeigte Dr. Thomas Riedle von LayTec. Über spezielle Optiken und eine softwarebasierte Auswertung ist es mit diesen Systemen möglich, die Dicken der verschiedenen Schichten auch inline zu messen respektive zu kontrollieren. Es kann nicht nur die Absorberschicht, sondern es können auch der Puffer und die transparente Elektrode vermessen werden. Neben der Schichtdicke sind sogar Messungen der Bandlücke und der Leitfähigkeit des Materials möglich. Auch optische Methoden lassen sich für die Vermessung von CIGS-Absorbern einsetzen, wie Sven Peters von Sentech zeigte.

Einige grundsätzliche Untersuchungen zur Defektstruktur in Chalkopyritmaterialien stellte Dr. Thomas Unold vom Helmholtz-Zentrum Berlin vor. Zunächst erläuterte er verschiedene Lumineszenztechniken und die damit jeweils zugänglichen Eigenschaften der Absorber. Ein wichtiger Aspekt bei Chalkopyritmaterialien sind die Korngrenzen. An ihnen können Ladungsträger rekombinieren, daher gelten möglichst große Kristallite als vorteilhaft. Bei Variation



Die Teilnehmer des Workshops in Berlin

des Verhältnisses von Indium zu Gallium verändert sich auch die Kristallitgröße. So können Kristallite von mehr als zwei Mikrometern Durchmesser entstehen, jedoch haben diese Schichten nicht die höchste Effizienz. Diese fand sich in den vorgestellten Versuchen bei einer Kristallitgröße von etwas unter einem Mikrometer. Tatsächlich sind manchmal sogar die einzelnen Kristallite in sich inhomogen und zeigen unterschiedliches Verhalten.

Neben dem Anteil der Kristallgrenzen hat auch die Pufferschicht einen starken Einfluss auf die Effizienz einer Dünnschichtzelle. Die Modellierungen und Messungen am *Helmholtz-Zentrum* zeigten aber auch, dass eine zusätzliche Barriere für Ladungsträger an der Rückseite des Halbleiters, an der Grenzfläche zum Molybdän, existiert. Dort müssen Defekte vorhanden sein, die nur schwer zu messen sind und mit Selen zusammenhängen könnten. So lautete die Zusammenfassung, dass Chalkopyrit-Solarzellen viele verschiedene Defekte zeigen und deren Wirkung und Interaktion bis jetzt erst in Ansätzen verstanden sind.

Auch um Defekte ging es im Vortrag von *Prof. Wagner* von der Universität Ulm. Er ist mit Hilfe von 2D-Simulationen den Auswirkungen von Defekten auf der Spur. Dazu werden ganze Module elektrisch modelliert. Damit lässt sich die Wirkung von lokalen Defekten wie beispielsweise Kurzschlüssen auf die Leistung des ganzen Moduls untersuchen und Messungen wie Photolumineszenz besser verstehen.

Paul Grunow vom *Photovoltaik-Institut* Berlin gab einen breiten Überblick über verschiedene Messverfahren für Photovoltaikmodule und die damit zugänglichen Ergebnisse. Dieses Institut besteht seit 2006 und ist eine privatwirtschaftliche Test- und Forschungseinrichtung. Mit den dort vorhandenen Simulations- und Messeinrichtungen können die unterschiedlichsten Betriebsbedingungen für Solarmodule nachgestellt werden, beispielsweise verschiedene Spektren oder Ausrichtungen oder Bestrahlungsintensitäten. Auch Degenerationserscheinungen nach Beleuchtung oder die Einwirkung von Feuchtigkeit und ihre Auswirkungen werden untersucht. *Paul Grunow* wies auch darauf hin, dass für die Gesamtenergieausbeute eines Moduls vor allem hier in Deutschland das Schwachlichtverhalten ganz entscheidend ist. Hier haben CIGS-Zellen klare Vorteile, denn sie haben fast keine spektralen Verluste, so dass

auch Wolken oder eine tief stehende Sonne keine stark negativen Effekte haben.

Ein weiteres Problem der Vorhersage der langfristigen Energieausbeute von CIGS-Zellen ist der so genannte *Light Soaking Effect*. Dies bedeutet, dass die Effizienz einer Zelle durch Bestrahlung mit der Zeit zunehmen kann. Dies lässt sich durch eine entsprechende Vorbestrahlung vor der eigentlichen Messung simulieren, es bleiben aber auch dann Unsicherheiten.

Um die Analyse und Vermessung von CIS- oder CIGS-Zellen ging es dann beim Vortrag von *Dr. Jeannette Wienke* von *PVflex* zur Herstellung flexibler CIGS-Zellen. Sie sind auf einem Stahlsubstrat aufgebaut und werden mit einer Prozesskette hergestellt, in der heute nur noch zwei Prozessschritte im Vakuum erfolgen. Molybdän und die Fensterschicht werden noch gesputtert, alle anderen Schritte beruhen auf elektrochemischen oder nasschemischen Verfahren. Sie werden auf einer Bandanlage mit einer Bandbreite von 35 Millimetern durchgeführt, wobei die Abweichung der Schichtdicke bei Gallium etwa drei Prozent über der Breite beträgt, für Kupfer und Indium ist sie geringer. Somit ist *PVflex* einer der Vorreiter einer vollständig bei Atmosphärendruck ablaufenden Produktion von Solarzellen und erreicht heute bei einer Zellgröße von einem Quadratmeter einen Wirkungsgrad von 10,7 Prozent. Für die Verkapselung der Zellen gegen Feuchtigkeit verwendet *PVflex* ein Lackierverfahren mit einem Sol-Gel-Material. Dieses wurde nach sehr ausführlichen Tests verschiedener Materialsysteme gefunden. Obwohl die Zellen heute noch nicht in der Produktion sind, entwickelt das Unternehmen ihre Modultechnologie mit externen Zellen ständig weiter und will schon 2011 Module mit einer Gesamtleistung von 50 MW pro Jahr auf einer neuen Linie fertigen und verkaufen. Parallel dazu wird die Technik zur Dachmontage ebenfalls ständig weiterentwickelt, so dass in drei Bereichen parallel entwickelt und teilweise auch schon vermarktet wird.

Steffen Schuler von *Global Solar* gewährte den Zuhörern einen Einblick in die Produktion dort, der einige beeindruckende Zahlen enthielt. *Global Solar* produziert die Zellen auf flexiblem Material von 300 Millimetern Breite und einer Länge von 700 Metern bis 100 Metern. Die Abscheidung von Kupfer und von Gallium erfolgt mit einer maximalen Abweichung

von drei Prozent sowohl über die Breite als auch über die gesamte Länge. Der Produktionsprozess wird direkt inline überwacht, damit sollen mehr als 99 Prozent gutes Material die Anlage verlassen.

Global Solar verkauft Zellen direkt an Kunden, wobei der beste Wirkungsgrad bei über 10,8 Prozent liegt. Für großes Staunen unter den Fachleuten sorgte die Aussage, dass die CIGS-Zellen des Unternehmens im Test unter feuchter Wärme (Damp Heat Test) ungekapselt erst nach mehr als 2000 Stunden eine Degradation zeigen. Dies steht im deutlichen Gegensatz zu den Aussagen aller anderen Referenten, die immer wieder auf die große Bedeutung der Verkapselung hinwiesen, um eine schnelle Degradation der Zellen zu verhindern. Angeblich hat *Global Solar* einen Weg gefunden, die Zellen über den Herstellprozess unempfindlich gegen Feuchtigkeit zu machen.

Eine sehr interessante Ergänzung der Prozesstechnologie für CIGS-Dünnschichtzellen stellte *Daniel Lincot* vom französischen Institut für Forschung und Entwicklung der Photovoltaischen Energiegewinnung (*IRDEP*) vor. Sein Institut arbeitet schon seit Jahren mit galvanischen Prozessen zur Absorberherstellung und hat die Aktivitäten nun auf die Fensterschicht ausgedehnt. Diese besteht aus Zinkoxid, einmal rein und einmal dotiert, um eine gute Leitfähigkeit zu erreichen. Heute werden Fensterschichten gesputtert, wobei als Dotierung Aluminiumatome verwendet werden. Die *IRDEP*-Arbeitsgruppe hat nun ein Verfahren entwickelt, mit dem sowohl reines, intrinsisches Zinkoxid als auch dotiertes Zinkoxid elektrochemisch hergestellt werden können. Diese Entwicklung war allerdings gar nicht einfach, denn eine positive Dotierung mit Aluminium wollte prozesstechnisch einfach nicht gelingen. Schließlich kamen die Forscher auf die Idee, das Zinkoxid negativ zu dotieren und verwendeten Chloridionen dafür. Das hat scheinbar gut funktioniert, jedenfalls konnten ausreichende Leitfähigkeiten bei guter Transmission erreicht und eine Zelle mit einem Wirkungsgrad von 15,8 Prozent hergestellt werden. Das ist eine beeindruckende Entwicklung, allerdings konnte bislang nichts über die Langzeitstabilität des Materials gesagt werden.

Einen guten Überblick über die vielfältigen Aspekte der Anlagen zur thermischen Behandlung von CIGS gab *Klaus Funk* von *Net-Work Consulting*. Er analysierte die technischen und ökonomischen Eigen-



schaften verschiedener Maschinenkonzepte für Temperöfen, wobei viel von diesem Wissen aus der Halbleiterindustrie stammt, die sich ja schon seit Jahrzehnten mit ähnlichen Prozesseinzelschritten beschäftigt wie die Dünnschichtindustrie.

Einen neuen Weltrekord für CIGS-Solarzellen konnte *Michael Powalla* vom Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (*ZSW*) verkünden. Das *ZSW* hat im Labor einen Wirkungsgrad von 20,1 Prozent erzielt und damit den Weltrekord nach Deutschland geholt. In den letzten sechzehn Jahren war das Nationale Labor für Erneuerbare Energien (*NREL*) aus den USA stets an der Spitze dieser Technologie gewesen. Bei dem am *ZSW* entwickelten Verfahren der Vakuum-Co-Verdampfung rechnet *Michael Powalla* im nächsten Jahr mit einem Wirkungsgrad von 13 Prozent bis 14 Prozent auf Modulebene bei einer Fläche von einem Quadratmeter, mittelfristig sollen es 15 Prozent bis 16 Prozent sein.

Daneben berichtete er noch von neuen Arbeiten zur Struktur des CIGS-Materials. So beeinflusst der Galliumgehalt das Verhalten des Halbleiters und bei Vakuum-Co-Verdampfungsprozessen lässt sich dieser über der Schichtdicke gezielt verändern. Auch mit neuen Puffermaterialien beschäftigt sich das *ZSW*, neben Zinksulfid wird beispielsweise auch Indium-

sulfid untersucht. Beide Werkstoffe bieten eine bessere Bandlücke und können jeweils mit verschiedenen Prozesstechniken abgeschieden werden.

Sehr detaillierte Messungen des Temperprozesses bei CIGS-Zellen stellte *Imo Kötschau* von *Centrotherm* vor. Dort wird der Tempersschritt bei Atmosphärendruck durchgeführt und zur genauen Analyse wurde dieser Ofen mit einem winkelauflösenden Röntgendiffraktometer (angle dispersive XRD) ausgerüstet, so dass während des Temperns in Echtzeit mit einer Messzeit von etwa einer Sekunde die innere Struktur des Materials untersucht und temperatur- und zeitabhängige Umwandlungen im Detail verfolgt werden können. Wichtig beim Temperprozess ist laut *Imo Kötschau* die Tiefenverteilung des Galliums. Befindet sich ein hoher Anteil des Galliums in der Nähe des Rückkontaktes, so hat das negative Auswirkungen auf die Leerlaufspannung der Zelle. Das Aufheizen im Temperprozess erfolgt bei *Centrotherm* innerhalb von 75 Sekunden auf 500 °C, die Gesamtdauer beträgt 250 Sekunden. Die Umwandlung des Absorbers beginnt bei etwa 400 °C bis 420 °C. Durch eine Optimierung der Galliumverteilung im Precursor konnte die Leerlaufspannung gesteigert werden, insgesamt ist das Galliumprofil sehr wichtig, um gute Strom-Spannungskurven zu erreichen. Der Umwandlungsprozess des Halbleitermaterials ist offensichtlich sehr schnell, eine Begrenzung stellt hier eher die Zeit dar, die für das Aufheizen des Substrats benötigt wird. Auf der Basis der gezeigten Messtechnik und der schon vorhandenen Erkenntnisse peilt *Centrotherm* für Ende 2010 einen Zellwirkungsgrad von 17 Prozent und einen Modulwirkungsgrad von 14 Prozent an.

Die besonderen Einsatzvorteile dünner, flexibler Solarzellen stellte nochmals *Alexander Braun* von *Solarion* heraus. Das Unternehmen entwickelt und produziert CIGS-Solarzellen auf Polyimidsubstrat. Dieser Kunststoff ist sehr widerstandsfähig und wird als dünne Folie eingesetzt. Besonders ist bei *Solarion* der Abscheideprozess für den Absorber. Hier wird ionenstrahlunterstütztes Aufdampfen bei einer Temperatur von 400 °C eingesetzt, das die Herstellung der Absorberschicht in einem Schritt ohne die Notwendigkeit einer weiteren Temperung erlaubt. Auf der dünnen, leichten und kostengünstigen Folie werden entweder einzelne Zellen oder monolithisch integrierte Module aufgebaut und flexibel verkapselt.

Damit stellt *Solarion* heute Zellen mit einer Effizienz von 14,1 Prozent her. Neben den flexiblen gibt es aber auch starre Glas-Glas-Module mit den auf Folie abgeschiedenen Zellen.

Avancis hat bereits 25 Jahre Erfahrung bei der Herstellung von Solarzellen, begann als *Arco Solar*, gehörte dann zu *Siemens*, schließlich zu *Shell Solar* und ist heute eine Tochterfirma von *Saint Gobain*. *Paul Mogensen* stellte den Produktionsprozess vor, dessen wichtige Schritte der Precursorabscheidung für den Absorber auch im Vakuum ablaufen. *Avancis* versieht das Glasgrundmaterial mit einer Barrierschicht, die eine Diffusion des Natriums in den Absorber verhindert. Stattdessen wird das Natrium bei der Abscheidung der Metallschichten in genau definierter Menge zugegeben, da es großen Einfluss auf den Wirkungsgrad und den Kurzschlussstrom hat. Über der Barriere wird zunächst Molybdän und dann Kupfer und Indium in diversen Schichtpaaren abgeschieden, oben auf diesen Stapel kommt dann noch Selen. Danach erfolgt die Temperung bei etwa 550 °C, bei der sich in wenigen Minuten der Halbleiter formiert. Auf eine entsprechende Nachfrage erklärte der Referent, dass Vakuumtechnologie nicht teuer sei, so lange der Maßstab groß genug gewählt werde.

Mit *Solibro* und *Sulfurcell* stellten weitere Unternehmen ihre Technologien und Produkte vor, die ausschließlich auf Vakuumverfahren basieren. Auch bei diesen Herstellern spielen in der Produktion Qualität, Durchsatz, Reproduzierbarkeit und die Hochskalierung der Produktion eine wichtige Rolle. Insbesondere die Steigerung der Produktionskapazitäten immer bei gleichzeitiger Weiterentwicklung der Herstelltechnologie hin zu höheren Effizienzen bestimmt darüber, ob mit wachsender Kapazität Möglichkeiten zur Kostensenkung genutzt werden können. Nur dann haben die meist kleinen Firmen die Chance, im Wettlauf mit den ganz großen Herstellern wie beispielsweise *First Solar* auch längerfristig zu bestehen und ihren Platz im Markt zu erobern.

Insgesamt gab es ein wirklich interessantes technisch-wissenschaftliches Programm auf hohem Niveau, auch wenn dieses Jahr bedingt durch die Aschewolke nach dem Vulkanausbruch einige internationale Referenten leider nicht teilnehmen konnten.

-Holeczek-