

Solarzellen und Plancksches Gesetz

Von Gottfried Heinrich Bauer und Thomas Unold

Über die Messung ihrer Strahlungsemission lassen sich Materialien und Solarzellen berührungslos analysieren, relevante Kenngrößen für die Wandlung von solarer Strahlung in elektrische Leistung ermitteln und Verlustprozesse identifizieren. Für eine Vielzahl von neuartigen aussichtsreichen Dünnschichtmaterialien lassen sich somit die Limits für ihre Eignung als Solarzellen vorhersagen.



Hochvakuumanlage zur Herstellung von amorphen Silizium-Dünnschicht-Halbleitern. Die Schichten werden bei niedrigerer Temperatur ($T \ll 200^\circ\text{C}$) aus der Gasphase (z.B. Silan) durch eine Glimmentladung direkt auf einem Glassubstrat abgeschieden. Indem mehrere verschiedene Schichten übereinander aufgebracht werden, lassen sich komplette Solarzellen herstellen.

Planck's Law and Solar Cells

By measuring the emission of radiation it is possible to analyze materials as well as solar cells in a touchfree way, to obtain relevant parameters concerning the conversion of solar radiation into electric power and to identify loss processes. The method can be readily applied to many novel thin film materials and can be used to estimate their suitability in solar cell devices.

Wegen der Endlichkeit der globalen fossilen und nuklearen Energievorräte ist eine der brennendsten Fragen der Menschheit die der künftigen Versorgung mit Energie. Als quasi-unerschöpfliche Energiequelle, mit einer Betriebszeit von mehr als vier weiteren Milliarden Jahren, steht uns die Sonne gewissermaßen rund um die Uhr und rund um den Globus zur Nutzung zur Verfügung. Sie versorgt die Erde mit 120.000.000 GW (Gigawatt, 1 GW entspricht 1 Million Kilowatt) Strahlungsleistung im ultravioletten, im sichtbaren und im infraroten Spektralbereich. Diese der Erde kontinuierlich zugeführte Leistung ist ungefähr das 10 000-fache unseres derzeitigen globalen Bedarfs. Die spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung war lange unverständlich und konnte erst 1900 von Max Planck mit der These erklärt werden, dass Energie nur in bestimmten Quanten aufgenommen und abgegeben werden kann. Das so genannte Plancksche Gesetz beschreibt das Spektrum und damit die Farbe der von einem heißen Körper ausgesandten Strahlung. "Kühle" Materie wie z.B. eine warme Herdplatte strahlt überwiegend im

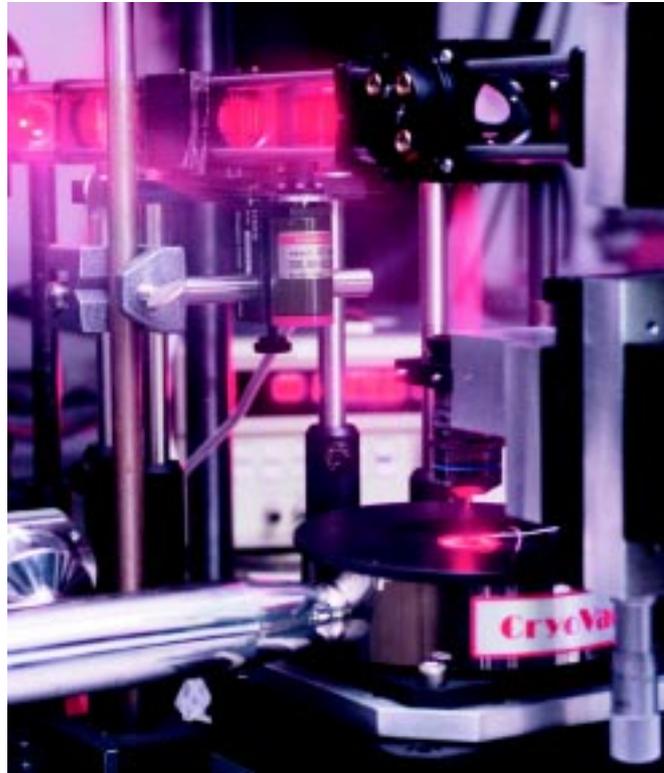
roten bis infraroten Bereich. Der Glühdraht einer Glühlampe mit einer Temperatur um 2.500°C strahlt große Anteile aller sichtbaren Frequenzen, d.h. blau bis rot, ab und erscheint dem Auge damit weiß. Wirklich "heiße" Materie wie die Sonne, mit einer Oberflächentemperatur von ca. 5.500°C , hat einen noch breiteren Frequenzbereich und gibt sogar einen signifikanten Anteil an ultravioletter Strahlung ab. Eine elegante Möglichkeit der Nutzung der solaren Strahlung, die in Form von elektromagnetischen Wellen von der Sonne emittiert wird und den Planeten Erde nach 150 Millionen Kilometern erreicht, besteht in der direkten Wandlung in elektrische Leistung in sogenannten "elektronischen Niveau-Systemen", z.B. in Halbleiter-Solarzellen. In diesen Prozessen werden Elektronen in dem Halbleitermaterial durch die Absorption der Energie von Strahlung (Quanten) in höhere Energiezustände transferiert und können sich während ihrer Aufenthaltsdauer in diesen angeregten Zuständen zu den Kontakten bewegen, wo diese Anregungsenergie als Spannung zur Verfügung steht. Da die Bewegung von Ladun-

gen gleichbedeutend mit elektrischem Strom ist, wird von solchen beleuchteten Halbleiterstrukturen elektrische Leistung abgegeben.

Stand der Solarzellentechnologie

Die zur Zeit kommerziell verfügbaren Solarzellen werden überwiegend aus kristallinem Silizium hergestellt. Dafür müssen hochreine Siliziumkristalle aus der Schmelze gezogen oder gegossen und anschließend in Scheiben von einer Dicke zwischen 0.25 und 0.40 Millimetern gesägt werden. Der Prozess hierfür ist identisch mit dem Prozess, der in der Halbleiterindustrie für die Chip-Produktion verwendet wird. Für die Solarzellenherstellung muss ein Dotiergas in einem Hochtemperaturofen in die Siliziumscheiben eindiffundiert und anschließend eine Antireflex-Beschichtung aufgebracht und schließlich die elektrische Kontaktierung vorgenommen werden. Dieser Herstellungsprozess ist sehr aufwendig, materialintensiv und teuer, insbesondere aufgrund der großen Menge an hochreinem Silizium, das benötigt wird. Es ist daher abzusehen, dass die auf kristallinem Silizium basierende Solarzellentechnologie kaum für eine großangelegte Solarenergienutzung, wie sie in den nächsten 50 Jahren zu erwarten ist, eine Rolle spielen wird.

Aus diesen Gründen wird derzeit weltweit Grundlagenlagenforschung zur Optimierung der Wandlungsmöglichkeiten von Solarstrahlung betrieben. Eines der Ziele dieser Forschungsanstrengungen ist die Präparation von neuartigen Materialien und Strukturen, die die Sonnenstrahlung sehr viel stärker absorbieren als kristallines Silizium, die also schon als so genannte "Dünnschichten" von wenigen Mikrometern Dicke die Basis für Solarzellen bilden können. Mit einer solchen Reduzierung der notwendigen Schichtdicke (mehr als Faktor 100 gegenüber kristallinem Silizium) können die Materialausbeute und der Energieeinsatz zur Herstellung deutlich verbessert und damit auch Kosten verringert werden. Ein weiterer Vorteil der Dünnschicht-Technologie ist, dass sie im Allgemeinen großflächig an-

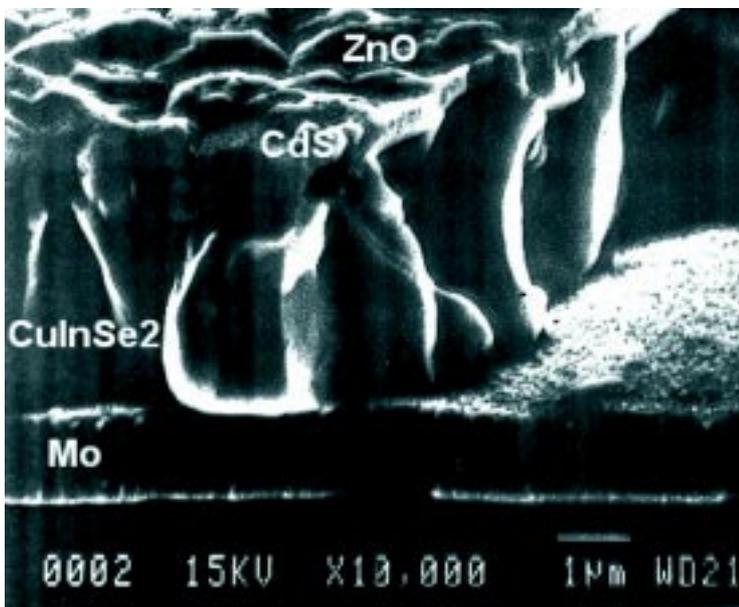


Blick auf einen Photolumineszenz-Messplatz zur Analyse von Rekombinationsprozessen und Beurteilung von Anregungszuständen in Halbleitern, die für Solarzellen Verwendung finden. Zu sehen ist das rote Licht eines Helium-Neon Lasers, das auf eine CuInSe_2 -Probe fokussiert wird, die sich in einem Kryostaten befindet. Mit Hilfe des Kryostaten kann die Temperatur der Probe zwischen Umgebungstemperatur und -269°C variiert werden. Durch Verschiebung eines piezo-gesteuerten Tisches unter dem Kryostaten können auch räumliche Inhomogenitäten des Materials im Sub-Mikrometer-Bereich untersucht werden.

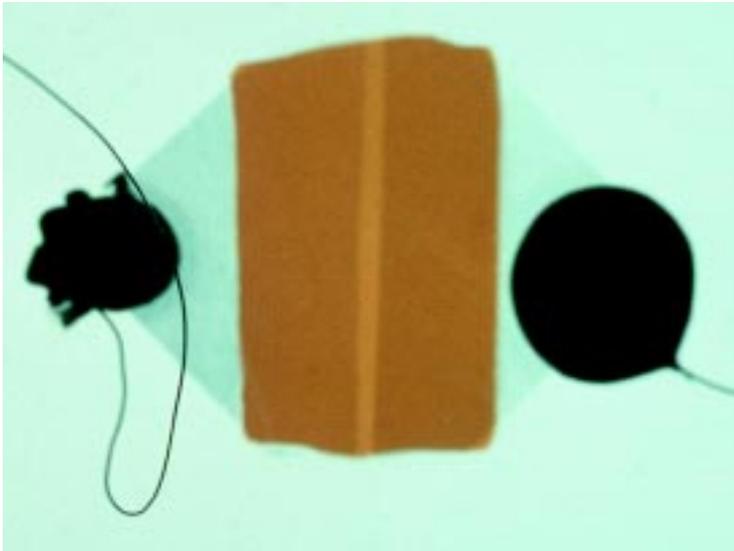
wendbar ist, vergleichbar mit einer Beschichtung von gewöhnlichem Fensterglas. Die meisten Dünnschichtmaterialien lassen sich auch auf flexible Substrate aufbringen, wofür sich wiederum neue Anwendungsmöglichkeiten erschließen.

Zukunftsträchtige Materialien

Derzeit für Solarzellen als sehr aussichtsreich betrachtete Dünnschicht-Halbleitermaterialien sind amorphes Silizium, polykristallines Kupfer-Gallium-Diselenid (CuInSe_2) und Kadmium-Tellurid (CdTe). Solarzellen aus amorphem (ungeordnetem) Silizium besitzen bereits heute einen Weltmarktanteil von ungefähr 30 Prozent. Amorphes Silizium kann in einem recht einfachen Gasphasen-Abscheidungsprozess bei relativ niedriger Temperatur ($T > 200^\circ\text{C}$) auf quadrate metergroße Glassubstrate aufgebracht werden und ist somit für großflächige Anwendungen bestens geeignet. Der Strahlungswandlungs-Wirkungsgrad von Solarzellen aus amorphem Silizium ($\eta = 6-8$ Prozent) liegt jedoch noch deutlich niedriger als der von kristallinem Silizium ($\eta = 13-14$ Prozent). Die Verbesserung dieses Wirkungsgrades ist daher das Ziel intensiver Forschungsanstrengungen. Viele der anderen gegenwärtig interessanten Solarzellenmaterialien (CuInSe_2 , CdTe , mikrokristallines Silizium) weisen eine so genannte mikrokristalline Struktur auf, in der unzählige kleine Kristallite mit Durch-



Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer Kupfer-Indium-Diselenid-Solarzelle. Deutlich zu sehen ist eine kolumnenartige Struktur mit Durchmessern im Bereich von mehreren Mikrometern. Die Untersuchung der Auswirkung der räumlichen Inhomogenitäten auf die Funktion von Solarzellen ist ein aktuelles Forschungsthema.



Dünnschicht-Halbleiter (Dicke $1\mu\text{m}$), der auf Glassubstrat abgeschieden wurde. Die etwas dunkleren Dreiecke unter der Schicht sind Aluminium-Metallkontakte und dienen Ladungstransportmessungen, mit denen die elektronischen Eigenschaften des Materials charakterisiert werden können.

messern im Mikrometer-Bereich aneinander stoßen. Diese inhomogene Struktur der Materialien wird verursacht durch die Anwendung von niederen Temperaturen und einfachen und kostengünstigen Verfahren bei der Materialherstellung. Der Einfluss dieser räumlichen Inhomogenitäten auf die Materialeigenschaften bzw. auf die Solarzeleigenschaften ist derzeit noch unklar und daher ein spannendes Forschungsthema, das auch in unserer Arbeitsgruppe verfolgt wird.

Neuartige Charakterisierungsmethoden

Die konventionellen Methoden zur Charakterisierung neuer Materialien und Materialstrukturen geben nur indirekt und bedingt Aufschluss über die Eignung zur Wandlung von Strahlung. Daher kann zumeist erst durch die vollständige Herstellung des endgültigen Bauelements, d.h. der Solarzelle, über die Tauglichkeit eines bestimmten Materials entschieden werden. Die Funktion des Bauelements selbst hängt allerdings sowohl von der Qualität der Materialien (im Volumen und an den Grenzflächen) als auch von der Qualität der verwendeten Technologie der Herstellung ab. Die Auswirkungen dieser beiden Einflussgrößen auf die Funktion von Solarzellen sind am fertigen Bauelement so gut wie nicht voneinander zu trennen.

In unserer Arbeitsgruppe verfolgen wir eine Charakterisierungsmethode, die es erlaubt, an Einzelschichten und an Schichtfolgen von Materialien sowie an vollständigen Bauelementen gleichermaßen Informationen über die Qualität von Solarzellen zu sammeln. Die Analyse der Messergebnisse ermöglicht abzuschätzen, wieviel Potenzial in einem bestimmten Material in Bezug auf

dessen Verwendung als Solarzelle steckt. Dazu untersuchen wir die von einer Solarzelle oder einem Halbleiter selbst abgegebene Strahlung. Wenn eine Solarzelle nicht beleuchtet wird, so hängt die von ihr abgegebene Strahlung nur von ihrer Temperatur ab (gemäß dem oben beschriebenen Planckschen Gesetz) und liegt bei Zimmertemperatur überwiegend im infraroten, d.h. nicht sichtbaren Bereich. Wird die Solarzelle jedoch beleuchtet, z.B. mit Laserlicht, dann wird die emittierte Strahlung um Größenordnungen verstärkt und kann jetzt auch messbare Anteile im sichtbaren Bereich enthalten. Dieses Phänomen des Leuchtens eines Materials unter Strahlungsanregung wird Photolumineszenz genannt und kann mit einem so genannten verallgemeinerten Planckschen Gesetz beschrieben werden. Die genaue Analyse der abgegebenen Strahlung unter verschiedenen Anregungsbedingungen erlaubt es uns, sozusagen berührungslos auf wichtige materialspezifische Parameter rückzuschließen als auch direkt den maximal erreichbaren Strahlungswandlungs-Wirkungsgrad eines Materials vorauszusagen.

Anwendung auf Dünnschicht-Halbleiter und -Solarzellen

Mit dem oben beschriebenen Verfahren analysieren wir derzeit Materialproben und Solarzellen, die entweder in Oldenburg selbst präpariert oder uns in Kooperationsvorhaben zur Verfügung gestellt werden (z.B. Zentrum für Solarenergie- und Wasserstoff Forschung [ZSW] Stuttgart, Hahn-Meitner Institut [HMI] Berlin, Forschungszentrum Jülich). Am Beispiel einer Folge von Einzelschichten mit dem Absorberhalbleiter Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid konnten wir kürzlich nachweisen,

wie sich die "Qualität" der Solarzelle in den Schritten des Aufbaus entwickelt und wie die spätere Funktion durch das Hinzufügen weiterer Schichten - bis zur fertigen Solarzelle - beeinflusst wird. Außerdem wird gerade in Kooperation mit einer Solarzellenfirma geprüft, inwieweit sich dieses Analyseverfahren zur Kontrolle der notwendigen Dünnschichtproduktionsprozesse eignet. Da diese Technologie die Deposition von dünnsten Schichten und Schichtfolgen auf möglichst große Flächen - bis zu mehr als einem Quadratmeter - mit sehr gut reproduzierbaren strukturellen, optischen und elektronischen Eigenschaften erfordert, ist eine laufende Prozesskontrolle äußerst wichtig. Die von uns verfolgte Methode hat den Vorteil, nicht nur die Eigenschaften und Qualität der Einzelschichten zu erfassen, sondern auch noch die Vorhersage zur Funktion und Qualität des "Endproduktes" Solarzelle zu ermöglichen.

Die Autoren



Prof. Dr. Gottfried Heinrich Bauer (rechts) studierte an der Universität Stuttgart. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Institut für Physikalische Elektronik. 1979 promovierte er im Bereich Plasma-Spektroskopie. 1993 nahm er einen Ruf auf eine Professur für Experimentalphysik an der Universität Oldenburg an. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Halbleiterphysik. Bauer leitete auf diesem Gebiet zahlreiche Forschungsprojekte und gehörte bzw. gehört verschiedenen nationalen und internationalen Gremien an, u.a. dem wissenschaftlichen Beirat des Instituts für Solarenergieforschung in Hameln sowie dem Editorial Board des Journals "Progress in Photovoltaics, Sussex" (Großbritannien).

Dr. Thomas Unold (links) studierte Physik in Heidelberg und an der University of Oregon, wo er 1993 auch promovierte. Nach seinem Studium war er zunächst als wissenschaftlicher Mitarbeiter u.a. am National Renewable Energy Laboratory (NREL) in Golden, Colorado, tätig. Seit 1996 ist er wissenschaftlicher Assistent in der Arbeitsgruppe Strahlungsumwandlung bei Prof. Dr. Gottfried Heinrich Bauer. Seine Forschungsschwerpunkte sind die Defektspektroskopie und optische Spektroskopie an inhomogenen Halbleiter-Dünnschichtmaterialien.

