

Dünnschicht-Solarzellen aus Silicium

Prof. Dr. Walther Fuhs
HMI
fuhs@hmi.de

Dr. Helmut Stiebig
FZJ
h.stiebig@fz-juelich.de

Dr. Stefan Reber
Fraunhofer ISE
stefan.reber@ise.fraunhofer.de

Silicium-Dünnschicht-Solarzellen stellen eine besonders attraktive Option für eine zukünftige PV-Technologie dar:

- Silicium (Si) hat grundsätzlich das Potenzial zu hohen Wirkungsgraden.
- Si steht praktisch unbegrenzt zur Verfügung.
- Die beteiligten Materialien und Prozesse sind nicht-toxisch und ökologisch unbedenklich.
- Si-Technologien sind eingeführt und als zuverlässig bekannt.
- Vielfältige Anwendungen von Silicium bewirken eine breite Kenntnis der Materialien und Bauelemente.

Unter den verschiedenen Ansätzen für Dünnschicht-Solarzellen aus Silicium ist die Technologie des hydrogenierten amorphen Silicium a-Si:H (Abb. 1a) am weitesten fortgeschritten. Module werden von mehreren Herstellern mit Wirkungsgraden von 6–8% gefertigt. Dies ist die einzige Dünnschicht-Technologie, die bislang einen nennenswerten Anteil am Weltmarkt erlangt hat (um 8%).

Abbildung 1a und b Netzwerkstruktur (random network) von amorphem Silicium (a-Si:H) und (b) Morphologie von mikrokristallinem Silicium

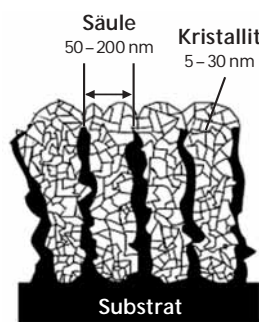
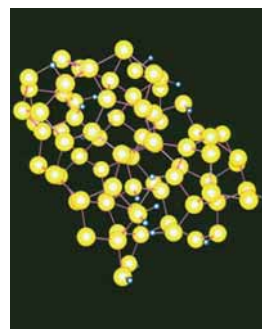
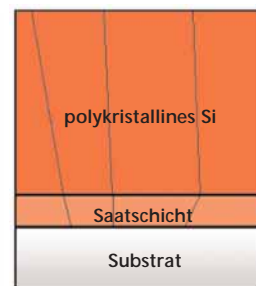
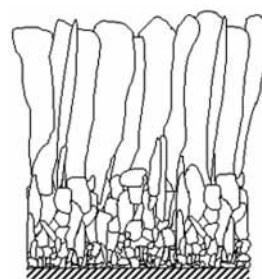


Abbildung 2a und b Morphologie von polykristallinem Silicium bei Abscheidung aus der Gasphase auf Fremdsubstrat. (b) Saat-schichtkonzept: In einem ersten Schritt wird eine polykristalline Si-Schicht hergestellt, auf der dann die Absorberschicht epitaktisch abgeschieden wird.

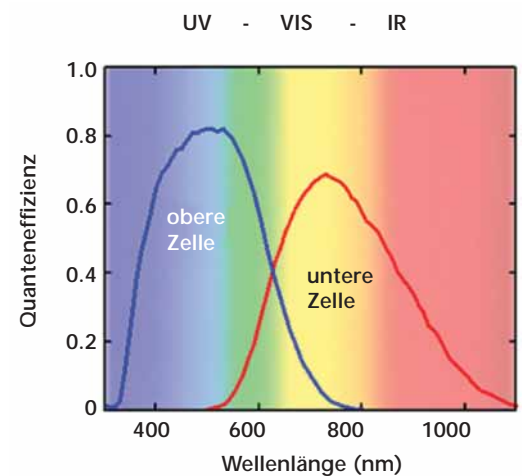
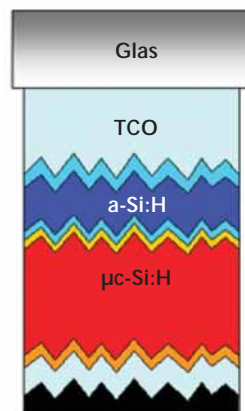


Kristalline Si-Dünnschichttechnologien versprechen aber höhere Modulwirkungsgrade. Deshalb werden weltweit große Forschungsanstrengungen zur Entwicklung solcher Solarzellen unternommen. Die verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsansätze unterscheiden sich grob durch ihre Prozesstemperaturen. Im Temperaturbereich unterhalb von 300 °C lässt sich mikrokristallines Silicium ($\mu\text{c-Si:H}$) mit den gleichen Abscheidungsverfahren (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) oder Hot Wire Deposition) wie a-Si:H herstellen. Charakteristisch für die Abscheidungsbedingungen ist der Einbau von Wasserstoff, der eine effektive Defektpassivierung bewirkt. Dieses kristalline Dünnschichtmaterial hat eine sehr komplexe heterogene Struktur. Es besteht aus nanokristallinen Bereichen, die in Säulen angeordnet und von ungeordneten Bereichen umgeben sind (Abb. 1b).

Als besonders aussichtsreich gelten a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ -Stapelzellen wie sie in Deutschland am Forschungszentrum Jülich entwickelt werden. Erhöht man die Prozesstemperaturen, so ergeben sich bei Abscheidung auf Fremdsubstraten feinkristalline, sehr heterogene Morphologien, die sich wegen der hohen Korngrenzendichten nicht für Solarzellen eignen (Abb. 2a). Deshalb werden Technologien verfolgt, bei denen zunächst eine grob-polykristalline Saatschicht hergestellt wird, auf der dann die elektronisch aktive Absorberschicht epitaktisch abgeschieden wird (Abb. 2b).

Das HMI verfolgt dabei einen Ansatz zu einer polykristallinen Dünnschichtzelle auf Glassubstraten und arbeitet deshalb mit Temperaturen $T < 600$ °C. In diesem Temperaturbereich liegt das zu lösende Problem in der Realisierung von epitaktischem Wachstum durch Verwendung von Ionen-gestützten Abscheidungsverfahren, bei denen die Energie für das Schichtwachstum durch Ionenbombardment kontrolliert eingebracht wird.

Die epitaktische Abscheidung bei hohen Substrattemperaturen $T > 1100\text{ °C}$ wird mit CVD-Verfahren durchgeführt. Dabei kann ein epitaktisches Wachstum mit Wachstumsraten von bis zu $10\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ realisiert werden. Das Fraunhofer ISE verfolgt hierbei ein Verfahren, bei dem zunächst die Saatschicht durch ein Zonenschmelzverfahren realisiert wird, auf die dann epitaktisch die Schichten bei Temperaturen um 1100 °C abgeschieden werden.



Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem und mikrokristallinem Silicium

Dünnschicht-Solarzellen aus amorphem (a-Si:H) und mikrokristallinem Silicium ($\mu\text{c-Si:H}$) können durch PECVD- oder Hot-Wire-CVD-Verfahren bei Temperaturen von $100\text{--}300\text{ °C}$ abgeschieden werden, was die Nutzung billiger Substrate (Glas, Stahlfolien, Kunststoff) erlaubt. Ein Nachteil dieser Dünnschichtmethoden ist jedoch die geringe Qualität des hergestellten Materials. So liegt die Lebensdauer der Ladungsträger für mikrokristallines Silicium mehr als drei Größenordnungen unterhalb der von kristallinem Silicium. Deshalb werden die Solarzellen als p-i-n¹ oder n-i-p Schichtenfolgen hergestellt und Teilsolarzellen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit zu Tandem- oder Tripelzellen kombiniert [1]. Der schematische Aufbau einer solchen Tandemstruktur ist in Abb. 3 gezeigt. Dieser Aufbau hat zwei signifikante Vorteile:

- Die p- und n-Schichten (typischerweise etwa 10 und 20 nm dick) erzeugen ein elektrisches Feld, welches sich über die undotierte Schicht (i-Schicht) erstreckt und zu einer effizienten Sammlung der in der i-Schicht absorbierten Ladungsträger führt.
- Durch die Verwendung von zwei Absorbermaterialien mit unterschiedlicher Energielücke wird das Sonnenspektrum selektiv genutzt.

Da in einem solchen Schichtsystem die Thermalisierungsverluste reduziert werden, haben Multispektralzellen einen höheren theoretischen

Wirkungsgrad. Als Basismaterial der p-i-n oder n-i-p Schichtenfolgen dienen a-Si:H und $\mu\text{c-Si:H}$ -Schichten mit einer Bandlücke von etwa 1,8 und 1,1 eV. Abb. 3 zeigt die spektrale Empfindlichkeit einer solchen amorphen/mikrokristallinen Tandemsolarzelle, die auf rauen transparent leitfähigen Metalloxidschichten (TCO) abgeschieden wurde. Das Licht fällt durch das Glassubstrat in die a-Si:H-Zelle (Topzelle) ein, die eine Schichtdicke von einigen 100 nm besitzt und den kurzwelligen Teil des Sonnenspektrums absorbiert. Die untere Zelle (Bottomzelle), die das langwellige Licht absorbiert, hat eine Dicke von einigen Mikrometern (μm). Den Frontseitenkontakt des Bauelements bilden ebenfalls transparente leitfähige Metalloxidschichten (TCOs), die zusätzlich in Kombination mit einem Metall auch als hochreflektierender Rückkontakt benutzt werden. Dieses Solarzellenkonzept führte bislang für große Module zu Wirkungsgraden von $9\text{--}10\%$ (Kaneka Corp.). Für Laborzellen wurden ca. 12% erreicht.

Die extrem dünnen Schichten einer solchen a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ -Zelle würden bei einfachem Lichtdurchgang nur einen sehr geringen Kurzschlussstrom ermöglichen, da der langwellige Spektralanteil nur unzureichend absorbiert wird. Hohe Wirkungsgrade lassen sich deshalb nur erreichen, wenn eine effektive Lichteinkopplung realisiert wird (light trapping). Um die Lichtausbeute zu erhöhen, werden daher TCO-Substrate mit rauen Oberflächen verwendet. Diese rauen Grenzflächen führen zu einer ver-

Abbildung 3
Schema einer Tandemstruktur aus amorphen und mikrokristallinen p-i-n-Strukturen (a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$ -Tandem) sowie Quantenausbeuten der oberen und unteren Zelle [1].
(Zu beachten: Licht fällt durch das Glassubstrat ein.)

¹ p-Schichten sind Löcher leitende Siliciumschichten, n-Schichten sind Elektronen leitende Siliciumschichten und i-Schichten sind elektrisch isolierende Siliciumschichten.

besserten Lichteinkopplung in die Solarzelle als Folge einer effektiven Brechungsindexgradierung am Übergang zwischen der TCO-Schicht und der p-Schicht. Darüber hinaus bewirken TCO-Substrate eine bessere Lichtstreuung und führen damit zur Verlängerung des Lichtabsorptionswegs in der Solarzelle. Bei Streuung oberhalb des Winkels der Totalreflexion kann das Licht mehrfach in der Solarzelle zwischen Rück- und Frontkontakt hin- und herreflektiert werden. Am FZ-Jülich wurde ein Prozess entwickelt, der durch eine nasschemische Behandlung von Zinkoxid (ZnO)-Schichten ein TCO-Substrat mit „random“-texturierter Oberfläche und hervorragenden Lichtstreuungseigenschaften erzeugt.

Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten liegen derzeit in der Erhöhung der Depositionsraten, Steigerung des Wirkungsgrads durch Realisierung neuer Methoden zum Lichteinfang (Photonenmanagement) und der Implementierung neuer Materialien in ein erweitertes Mehrschicht-Konzept. Besondere Bedeutung haben die Fragen der Entwicklung industriemäßiger Herstellungsprozesse und die Übertragung der Solarzellenstrukturen auf Module.

Kristalline Si-Dünnschicht-Solarzellen auf Fremdsubstrat (Niedertemperaturpfad)

Das zentrale Problem der Entwicklung einer polykristallinen Dünnschichtsolarzelle auf kostengünstigen Substraten wie Glas ist die Herstellung einer kristallinen Schicht mit großer Korngröße. Dies gilt vor allem bei der Verwendung von Glas, weil dabei die Prozesstemperaturen auf Werte unterhalb der Erweichungstemperatur von etwa 600 °C begrenzt sind. Um Wirkungsgrade im Bereich von 15 % zu erreichen, muss die kristalline Siliciumschicht Korngrößen haben, die deutlich größer als die Dicke der Absorberschicht in der Zelle (wenige Mikrometer) sind. Große Kristallitgrößen lassen sich erreichen, indem man zunächst amorphes Silicium abscheidet und dieses dann durch verschiedene Verfahren rekristallisiert. Folgende Verfahren sind in der Entwicklung:

- thermische Kristallisation (SPC)
- Laserkristallisation (LC)
- metallinduzierte Kristallisation (MIC)

Sehr gute Resultate wurden bereits mit dem SPC-Verfahren erreicht. Sanyo Corporation hat mit einem solchen Prozess im Labor eine polykristalline Si-Zelle mit einem Wirkungsgrad von 9,5 % vorgestellt. Ein Modul mit einem Wirkungsgrad von 8,2 % wurde kürzlich von Pacific Solar präsentiert, welches ebenfalls in einem SPC-Verfahren hergestellt wurde.

Die Laserrekristallisation wurde bislang vor allem zur Herstellung von Saatschichten verwendet. Erste Ansätze eine komplette Zelle durch Laserkristallisation zu erzeugen, werden am Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT) in Jena untersucht.

Das HMI verfolgt ein Verfahren, bei dem die elektronisch aktive polykristalline Si-Schicht in einer Dicke von 2–3 µm durch epitaktisches Wachstum auf einer polykristallinen Saatschicht erzeugt wird [2]. Bei diesem Ansatz wird die Saatschicht durch einen MIC-Prozess mit Aluminium (Al) erzeugt, wobei eine Schichtfolge Glas/Al/a-Si durch eine Temperung bei 400–500 °C in eine Schichtfolge Glas/poly-Si/Al(Si) umgewandelt wird (Abb. 4). Nach chemischem Ablösen der Al(Si)-Schicht erzeugt man so eine kristalline Siliciumschicht mit einer Korngröße von 10–20 µm und einer Vorzugsorientierung mit einer (100) Flächennormalen. Diese Schicht ist stark p-leitend und kann als Rückkontakt einer p⁺pⁿ⁺-Zelle verwendet werden. Die (100)-Vorzugsorientierung ist eine wichtige Voraussetzung für den schwierigsten Prozessschritt nämlich das epitaktische Wachstum in diesem Niedertemperaturbereich. Wegen der niedrigen Abscheidetemperaturen werden dazu Abscheidungsverfahren benötigt, die es ermöglichen, während des Schichtwachstums Energie in die wachsende Schichtoberfläche einzukoppeln. Dies ist beispielsweise möglich durch geeigneten Ionenbeschuss während der Abscheidung. Die oberste Emitterschicht einer solchen Zelle muss ebenfalls in einem Niedertemperaturschritt realisiert werden.

Der vielversprechendste Weg ist derzeit eine Heterostruktur mit a-Si:H. Solche Hetero-

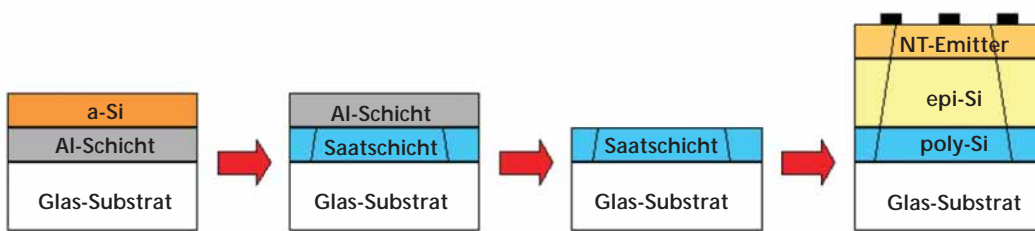


Abbildung 4a
Schema der Methode zur Herstellung einer polykristallinen Si-Dünnschichtzelle auf Glassubstrat

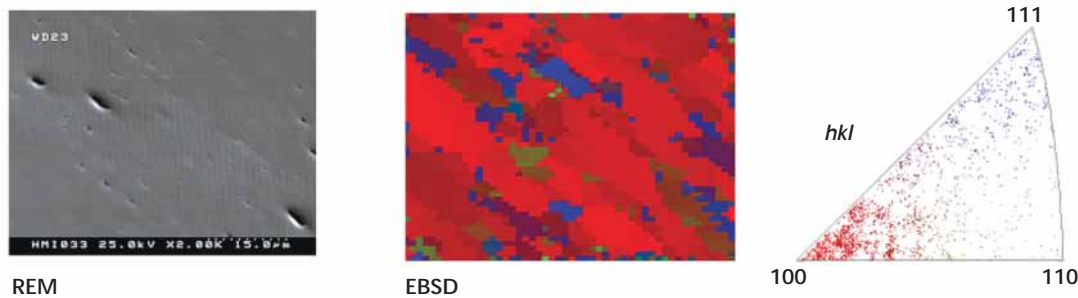


Abbildung 4b
Struktur einer durch Al-induzierten Kristallisation hergestellten polykristallinen Si-Saatschicht: REM-Bild der Oberfläche, Mapping der Oberflächenorientierung durch Electron Backscattering Diffraction (EBSD), Polfigur. Rot markiert: Orientierung nahe an (100) [2]

übergänge lassen sich inzwischen in so hervorragender Qualität herstellen, dass der Wirkungsgrad von Heterostruktur-Solarzellen nicht durch die Qualität der Grenzfläche begrenzt ist. Die Realisierung einer solchen polykristallinen Si-Solarzelle liegt dennoch in der Zukunft. Ihre Verwirklichung erfordert langzeitorientierte Forschung z. B. die Entwicklung von Prozessen und Abscheideverfahren mit ausreichend hoher Depositionsrate, eine Beherrschung der Defektpassivierung und Techniken für den Lichteinfang.

Kristalline Si-Dünnschicht-Solarzellen auf Fremdsubstrat (Hochtemperaturpfad)

Der sogenannte „Hochtemperaturansatz“ erhält seinen Namen durch die Erweiterung der Temperaturgrenze bis über den Schmelzpunkt von Silicium bei 1400 °C hinaus. Dies hat erhebliche Auswirkungen: Abscheidungen von Silicium können sehr schnell (bis ca. 10 µm/min) und mit hoher Qualität epitaktisch durchgeführt werden. Als Ausgangsmaterial kann das kostengünstige Trichlorsilan eingesetzt werden, welches in ausreichendem Umfang verfügbar ist. Alle Solarzellenprozesse der Wafer-Solarzellen-

technologie können mehr oder weniger unverändert übernommen werden. Diesen Vorteilen steht aber auch ein großer Nachteil gegenüber: Das kostengünstige Substratmaterial Glas kann nicht eingesetzt werden, es muss stattdessen auf andere, hochtemperaturfeste Materialien zurückgegriffen werden, die aber trotzdem die anspruchsvollen Kostenziele erreichen müssen.

Zur Verwirklichung des Hochtemperaturansatzes werden mehrere Wege beschritten, von denen zwei hier näher erläutert werden: Beide nutzen die Idee des „Waferäquivalents“, d. h. die erzeugten Substrat/Schicht-Kombinationen sollen genauso wie ein Siliciumwafer zu Solarzellen prozessiert werden können. Abb. 5 zeigt den Schichtaufbau der beiden Wege. Das „epitaktische Waferäquivalent“ (links) wird durch eine epitaktische Abscheidung von Silicium auf einem kostengünstigen, kristallinen Si-Substrat erzeugt.

Für das „rekristallisierte Waferäquivalent“ (rechts) wird zunächst auf beliebigen hochtemperaturfesten Substraten eine Saatschicht unter Einbeziehung eines zusätzlichen Zonenrekristallisations-Schritts hergestellt, auf die dann epitaktisch abgeschieden wird. Aufgrund der unterschiedlichen Komplexität der beiden Waferäquivalent-Konzepte ist ihr jeweiliger Entwicklungs-

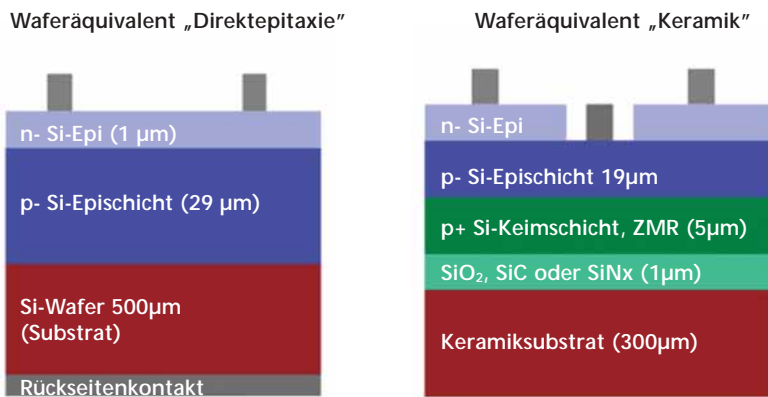


Abbildung 5
 Schema der Waferäquivalente „Direktepitaxie“ und „Keramik“ durch CVD-Abscheidung auf einen Si-Wafer oder ein Keramiksubstrat. In beiden Fällen kann die Prozessierung zu Solarzellen ähnlich wie bei der üblichen Si-Wafertechnologie durchgeführt werden [3].

stand verschieden. Das einfacher aufgebaute epitaktische Waferäquivalent „Direktepitaxie“ führt inzwischen mit Standard-Siebdrucktechnologien zu Solarzellen. Die entsprechenden Solarzellenparameter entsprechen denen von Wafersolarzellen, mit Ausnahme des Kurzschlussstroms, welcher durch die Anzahl absorbiertes Photonen bestimmt wird. Bei epitaktischen Waferäquivalenten durchdringen 10–20% der einfallenden Photonen die aktive Siliciumschicht ohne absorbiert zu werden und gehen im Substrat verloren. Dies verringert den Wirkungsgrad. Trotzdem betragen die Wirkungsgrade je nach angewandter Technologie zwischen 12% und 15% auf Flächen um 25 cm².

Beim rekristallisierten Waferäquivalent sind die bisherigen Solarzellenflächen im Bereich von 1–10 cm² noch deutlich kleiner. Obwohl die Substratgrößen durchaus über 10 cm x 10 cm groß sein können, führt der Schichtaufbau zu Schwierigkeiten beim Zellprozess, insbesondere wenn nichtleitfähige Substrate und Zwischenschichten verwendet werden. Entsprechend sind die erreichten Wirkungsgrade etwas niedriger als beim epitaktischen Waferäquivalent. Je nach Substrat schwanken diese zwischen 10,7% (SiSiC-Keramik mit SiO₂-/SiNx-Zwischenschicht) und 13,5% (mc-Si mit SiO₂-Zwischenschicht) [3].

Ein wesentlicher Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten ist die Skalierung der Zellen auf Flächen um 100–200 cm². Nur dadurch lässt sich die Idee des Waferäquivalents auch tatsächlich in produktionsnahen Umgebungen verwirklichen. Eine Grundvoraussetzung für die Skalierung ist die erfolgreiche Entwicklung von hochproduktiven Abscheidungsverfahren für Silicium hoher

Kristallqualität. An dieser technologischen Fragestellung wird in mehreren Forschungsinstituten Europas intensiv gearbeitet. Auch die Entwicklung wichtiger Prozessschritte wie z. B. Abscheidung leitfähiger Zwischenschichten, die die strengen Prozessanforderungen erfüllen, ist Gegenstand intensiver Forschungs- und Entwicklungsarbeit.

Schließlich ist die Anpassung der Solarzellen-Herstellungsprozesse insbesondere beim rekristallisierten Waferäquivalent eine bedeutsame Aufgabe, die die Metallisierung auf unebenen Schichtoberflächen, oder die effektive Wasserstoffpassivierung defektreicher Si-Schichten umfasst. Durch das Konzept der Waferäquivalente ergibt sich eine reelle Chance, kristalline Si-Dünnschicht-Solarzellen ohne die Notwendigkeit enormer Investitionen graduell in die Solarzellenproduktion einzuführen. Während das epitaktische Waferäquivalent in einem Zeitraum von nur wenigen Jahren die Produktionstauglichkeit erreichen kann, besitzt das rekristallisierte Waferäquivalent eine etwas längerfristige Perspektive.

Tab. 1 fasst die Charakteristika der verschiedenen Ansätze für Dünnschicht-Solarzellen zusammen. Neben den hier dargestellten Ansätzen sind in der Tabelle auch Daten für Zellen und kleine Module angegeben, die mit Hilfe einer Transfer-technologie hergestellt wurden, die zu einer monokristallinen Si-Zelle auf einem Fremdsubstrat führen. Solche Ansätze werden am Zentrum für Angewandte Energietechnik (ZAE) in Erlangen [4] und am Institut für Physikalische Elektronik der TU Stuttgart [5] verfolgt. Diese Verfahren, beruhen darauf, dass zunächst auf einem Einkristall eine poröse Trennschicht gebildet wird, auf die dann in einem Hochtemperaturschritt epitaktisch mit CVD-Verfahren eine monokristalline Si-Schicht mit einer Dicke von 25–50 µm abgeschieden wird. Diese monokristalline Schicht kann ähnlich wie ein Si-Wafer zu einer Solarzelle prozessiert werden, nachdem sie vom Einkristall längs der porösen Si-Schicht getrennt und auf ein anderes Substrat (Glas oder Plastik) übertragen (PSI-Prozess) wird. Der Vorteil solcher Techniken liegt in der mehrfachen Wiederverwendbarkeit des einkristallinen Substrats. Diese Lift-off-Techniken und die Si-Zellen des Hochtemperaturpfads befinden sich mit Absorber-

Technologie	Status	Herstellung	Herausforderung
a-Si:H $\mu\text{c-Si:H}$ a-Si:H/ $\mu\text{c-Si:H}$	L 13,2% M 6–8% L 9,1% L 12% M 9–10%	PECVD Glas, Plastik, Metall R = 30 nm/min $T_S = 100\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$ D = 1–3 μm pin-Struktur	Fläche Depositionsrate Wirkungsgrad Tripel Tandem Photon-Management
polykristallines Silicium Niedertemperaturpfad	L 9,2% (SPC) M 8,2% (SPC)	ionengestützte Abscheidung Glas R = 30–100 nm/min $T_S < 600\text{ }^\circ\text{C}$ D = 2–5 μm p^+pn^+ -Struktur	Machbarkeit Depositionsverfahren für Epitaxie Depositionsrate Defektpassivierung Lighttrapping
multikristallines Si Hochtemperaturpfad	L 8–11% [3]	CVD-Verfahren Keramik R bis zu 10 $\mu\text{m}/\text{min}$ $T_S > 1100\text{ }^\circ\text{C}$ D = 20–30 μm pn-Übergang	HT-Substrate Zwischenschichten Flächen Durchsatz
monokristallines Si	L 15,4% (oL) [4] L 16,6% (mL) [5]	Lift off (PSI – Prozess mit porösem Si) D > 25 μm , pn-Übergang	Flächen Industrielle Prozesse Durchsatz

Tabelle 1

Charakterisierung der Ansätze für Si-Dünnschicht-Solarzellen. R Depositionsrate, T_S Abscheidetemperatur, D Dicke der elektronisch aktiven Schicht der Zelle, L Laborzelle, M Industriemodul, oL und mL ohne bzw. mit Photolithographie

dicken um 25–50 μm nahe an dem Forschungstrend zu dünneren Si-Wafern und schließen damit die Lücke zwischen den Dünnschichttechnologien und den ultradünnen Si-Wafern.

Literatur

- [1] B. Rech, J. Müller, T. Repmann, O. Kluth, T. Roschek, J. Hüpkes, H. Stiebig, W. Appenzeller: „Amorphous and microcrystalline silicon based solar cells and modules on textured substrates“, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 762 A3.1
- [2] S. Gall, J. Schneider, J. Klein, M. Muske, B. Rau, E. Conrad, I. Sieber, W. Fuhs, C. Ornaghi, D. Van Gestel, I. Gordon, K. van Nieuwenhuysen, G. Beaucarne, J. Portmans, M. Stöger-Pollach, J. Bernardi, P. Schattschneider, O. Van der Biest: „Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells on Foreign Substrates: The European Project METEOR“, European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris 2004 (eingereicht)
- [3] T. Kieliba, J. Pohl, A. Eyer, C. Schmiga: „Optimization of c-Si Films formed by Zone-Melting Recrystallization for Thin-Film Solar Cells“, Proceedings of the 3rd World Conference on Solar Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003
- [4] R. Brendel, K. Feldrapp, R. Horbelt, R. Auer: „15,4% efficient and 25 μm thin crystalline Si solar cell from layer transfer using porous silicon“, phys. stat. sol [a] 197 (2003) 497
- [5] R. B. Bergmann, C. Berge, T. J. Rinke, J. Schmidt, H. J. Werner: „Advances in Monocrystalline Si Thin Film Solar Cells by Layer Transfer“, Solar Energy Materials and Solar Cells 74 (2002) 213