

Neue Silicium-Solarzellenstrukturen für höhere Wirkungsgrade

Einführung

Um die Kosten des Solarstromes zu senken, wird gegenwärtig der Weg verfolgt, durch Massenfertigung und weitgehende Automatisierung den Preis der mit über 85 % Marktanteil dominierenden kristallinen Silicium-Solarzellen zu senken. Um die Konkurrenzfähigkeit mit den fossilen Energieträgern zu erreichen, müssen außerdem durch innovative Konzepte drastische Erhöhungen des Wirkungsgrades erzielt und kostengünstige Materialien verwendet werden. Grundbedingung für eine Massenproduktion großflächiger Solarzellen ist, dass vergleichsweise einfache, energie- und zeiteffiziente Fabrikationsprozesse zur Anwendung kommen. Komplizierte Justiervorgänge, Masken und Photolithographie, wie sie bisher zur Herstellung höchsteffizienter Laborzellen benötigt werden, sind dabei ausgeschlossen.

Der Wirkungsgrad hat erheblichen Einfluss auf die Kosten eines Photovoltaiksystems. Mit steigendem Wirkungsgrad erhöht sich die Ausgangsleistung einer Solarzelle und damit ist eine erhebliche Kostensenkung für den Solarstrom zu erreichen, wenn der Herstellungsaufwand nicht unverhältnismäßig stark zunimmt. Durch einen höheren Wirkungsgrad kann die gleiche elektrische Leistung mit weniger Solarzellen- bzw. Modulfläche erzielt werden. Hiermit geht also automatisch eine Verringerung aller

flächenproportionalen Kosten einher. Letztere machen mehr als 70 % der Kosten eines PV-Systems aus. In *Tab. 1* sind Beispiele von Komponenten eines kristallinen Silicium-PV-Systems angeführt, deren Kosten flächenabhängig sind. Es ist anzumerken, dass allein die Siliciumscheiben 50 % der Modulkosten ausmachen. Mehr Leistung mit weniger Silicium zu erzielen ist daher eine der wichtigen Konsequenzen der Wirkungsgraderhöhung.

Gegenwärtig liegt der Laborspitzenwert kleinflächiger, sehr kompliziert herzustellender einkristalliner Silicium-Solarzellen bei knapp 25 %. Die kommerziellen Solarzellen erreichen jedoch nur Wirkungsgrade zwischen 14 und 16 %. In jüngster Zeit hat das Interesse der Industrie an höchsteffizienten Silicium-Solarzellen zugenommen [1]. Von der japanischen Firma Sanyo (HIT-Zelle) und der US Firma Sun Power wird die Produktion von Solarzellen mit Wirkungsgraden um 20 % angekündigt.

Unserer Meinung nach sollten künftige industrielle Silicium-Solarzellen Wirkungsgrade über 20 % erreichen, wobei Fertigungsprozesse zum Einsatz kommen müssen, die möglichst nicht kostspieliger sind als die herkömmlichen, um den Kostenvorteil durch die Wirkungsgraderhöhung voll nutzen zu können.

Prof. Dr. Rudolf Hezel
ISFH
hezel@isfh.de

Stefan Glunz
Fraunhofer ISE
stefan.glunz@ise.fraunhofer.de

Si-Grundmaterial	Scheibenerstellung	Solarzellenprozess	Modulfertigung	Installation	Wartung
Höchstreines Si	Kristallziehen	Reinigung	Zellenverschaltung	Transport	Reinigung
Reinigungs- u. Abscheideprozesse	Sägen	Schichtabscheidung	Laminieren	Aufständering	Reparatur
	Ätzen	Diffusion	Glas, EVA, Tedlar	Verdrahtung	
Chemikalien		Ätzen	Rahmen		
		Metallisierung	Anschlussbox		
		Messung	Testen		
			Verpacken		

Tabelle 1
Beispiele von Komponenten eines PV-Systems (kristallines Silicium), deren Kosten flächenabhängig sind. Die Kosten von Wechselrichter, Schaltern, Zählern, Sensoren etc. sind weitgehend leistungsabhängig.

In diesem Artikel werden innovative Solarzellenstrukturen mit hohem Wirkungsgradpotenzial, industrieller Umsetzbarkeit und vergleichsweise niedrigen Kosten vorgestellt. Die Forschungsarbeiten erstrecken sich von frontseiten- über rückseitenkontaktierte und damit doppelseitig (bifacial) nutzbare Zellen bis hin zu neuen Bifacialanwendungen, wodurch eine Steigerung der Ausgangsleistung um über 60% durch zusätzliche Nutzung des auf die Rückseite auffallenden Lichtes erreichbar ist. Weiterhin wird eine neue, für industrielle höchsteffiziente Solarzellen vorteilhaft einsetzbare Rückseitenkonfiguration sowie deren Anwendung für sehr dünne Si-Solarzellen vorgestellt.

OEEO-Solarzellen – höchste Wirkungsgrade in der Massenfertigung

Vom ISFH wird ein neuer Weg zu Spitzenwirkungsgraden kristalliner Silicium-Solarzellen in der Massenfertigung beschrieben. Die innovative Technik beruht auf einer maskenfremen selbstjustierenden Methode der Kontaktherstellung in Verbindung mit einer strukturierten Zellenoberfläche. Dieses Verfahren beruht unter Ausnutzung des Selbstabschattungseffektes auf der Schrägaufdampfung der Kontaktfinger im Vakuum (Obliquely Evaporated COntacts). Daher wurde für die auf diese Weise hergestellten Bauelemente die Bezeichnung „OEEO-Solarzellen“ eingeführt. Sie zeichnen sich durch das

Potenzial für sehr hohe Wirkungsgrade (> 20%), eine relativ einfache Prozessierung und Umweltfreundlichkeit bei Herstellung, Betrieb und Entsorgung aus.

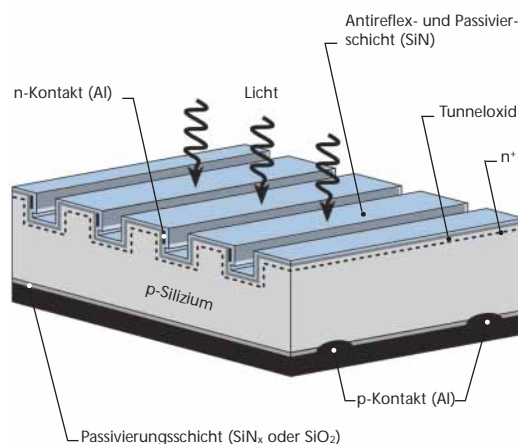
Die Standard-OEEO-Solarzelle

In *Abb. 1* ist die Struktur der Standard-OEEO-Solarzelle schematisch dargestellt. Die charakteristischen Merkmale sind [2]:

- Eine mechanisch erzeugte Oberflächenstruktur, die es erlaubt, die Vorderseitenkontakte an senkrecht verlaufenden Grabenflanken anzubringen. Dadurch sind die Abschattungsverluste durch die Metallfinger auf ein Minimum begrenzt.
- Ein flacher homogener Emitter mit hoher Quantenausbeute im kurzwelligen Bereich des Sonnenspektrums, wird durch eine einstufige Diffusion erzeugt (kein selektiver Emitter).
- Durch Schrägaufdampfung von Aluminium im Vakuum und Erzeugung eines ultradünnen Tunneloxids maskenlos hergestellte hochwertige MIS-Kontakte
- Optimale Passivierung der Solarzellenoberflächen durch im Plasma abgeschiedenes Siliciumnitrid bzw. thermisches Oxid

Der für Höchsteffizienz solarzellen relativ einfache Herstellungsprozess basiert neben den üblichen Reinigungsvorgängen im Wesentlichen auf den vier obigen unkompliziert und auch großflächig durchführbaren technologischen Schritten: Oberflächenstrukturierung, Phosphordiffusion, Metallisierung durch Schrägbedampfung und Oberflächenpassivierung.

Abbildung 1
Die Standard-OEEO-MIS-n⁺p-Solarzelle mit mechanisch erzeugter Oberflächenstruktur und maskenlos schräg aufgedampfter Vorderseitenmetallisierung



Am ISFH wurden im Rahmen des Aufbaus einer Pilotlinie neue kostengünstige und einfach automatisierbare Produktionsanlagen- und prozesse einschließlich einer neuartigen Verbindungstechnik unter Verwendung von leitfähigen Klebstoffen entwickelt. Als entscheidender Erfolg ist zu werten, dass es gelang, den bereits im Labormaßstab erreichten Wirkungsgrad von 20% auf einer Solarzellenfläche von 10 cm x 10 cm trotz drastisch gesenkter Prozesskosten aufrecht zu erhalten. Für 4 cm² große Zellen wurde ein Wirkungsgrad von 21,1% erreicht [2].

Die rückseitenkontaktierte bifaciale OEKO-Solarzelle

Die wohl eleganteste Anwendung der OEKO-Technik besteht darin, beide Kontaktsysteme auf einfache Weise auf der Rückseite der Solarzelle anzubringen (BACK OEKO). Es ergeben sich folgende Vorteile [1], [3]: keine Abschattung durch das Frontkontaktgitter, Vereinfachung der Modulfertigung, besseres Erscheinungsbild sowie doppelseitige Lichtempfindlichkeit ohne Zusatzaufwand. In Abb. 2 ist eine Ausführungsform der neuen rückseitenkontaktierten OEKO-Solarzelle schematisch dargestellt.

Die Hocheffizienzeigenschaften entsprechen, abgesehen von der abschattungsfreien Vorderseite, weitgehend denen der Standard-OEKO-Solarzelle. Als besonderes Merkmal kommt hinzu, dass als Option auch das auf die Rückseite auffallende Licht sehr effizient genutzt werden kann. Was den kostengünstigen Herstellungsprozess betrifft, so sind viele Schritte identisch mit denen der Standard-OEKO-Zelle. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, dass beide Kontaktsysteme mit Hilfe der Schrägbedampfungsmethode ohne Masken oder Justierung, automatisch exakt voneinander getrennt, auf der Rückseite erzeugt werden. Die Vorgehensweise ist in Abb. 3 dargestellt.

Schon in sehr kurzer Zeit konnte für die Vorderseite ein Wirkungsgrad von 18,3%, für die Rückseite 17,6% erzielt werden. Aus Simulationsrechnungen geht hervor, dass Wirkungsgrade um 22% für Vorder- und Rückseite möglich sind, so dass es sich hier um eine höchsteffiziente symmetrische bifaciale Solarzelle handelt. Sie wird zusammen mit den beiden eingangs genannten Solarzellen von Sanyo und Sun Power als Kandidat für den künftigen industriellen Wirkungsgradbereich über 20% diskutiert [1].

Neue Anwendungen von Bifacial-Solarzellen

Am ISFH wurden kürzlich innovative Anwendungen von Bifacial-Solarzellen entwickelt [4]: In Abb. 4 handelt es sich um eine multifunktionale Sonnenschutzmarkise mit parallelen Strings

von Bifacial-Solarzellen und einer weißen semi-transparenten Reflektorplatte. Abb. 5 zeigt eine Anordnung von schmalen Bifacialmodulen vor einer weißen Fassade. In beiden Fällen sind auf einfache Weise Steigerungen der Ausgangsleistung um mehr als 60% im Vergleich zur rein vorderseitigen Nutzung der Zellen möglich. Mit diesen Anordnungen wird daher für die obige rückseitenkontaktierte Bifacial-OEKO Solarzelle nach Optimierung eine Ausgangsleistung erwartet, die einer gleich großen monofacialen Zelle mit 30% Wirkungsgrad entspricht.

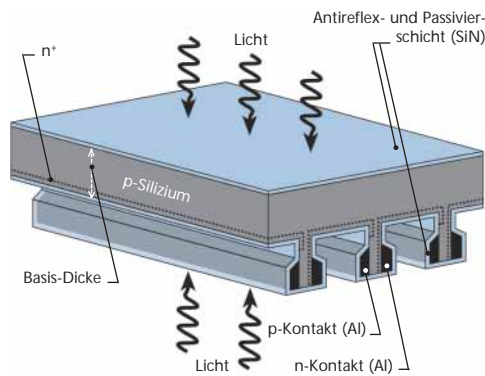


Abbildung 2 Schematischer Aufbau der rückseitenkontaktierten bifacialen OEKO-Solarzelle

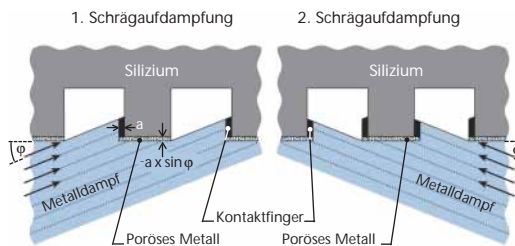


Abbildung 3 Prinzip der selbstjustierenden Kontaktherstellung auf der Rückseite von BACK-OEKO-Solarzellen durch Schrägbedampfung von Metall auf beide Seiten der Flanken. Es wird eine exakte Trennung der n- und p-Kontakte erreicht.



Abbildung 4 Multifunktionale Sonnenschutzmarkise mit doppelseitig lichtaufnehmenden Solarzellen und weißer, semi-transparenter Rückwand

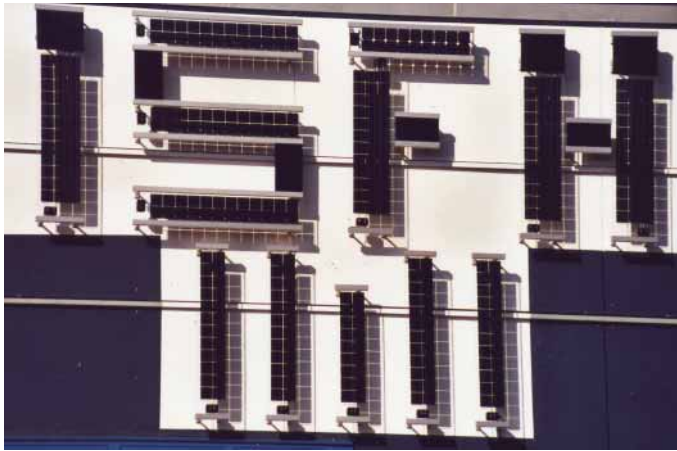


Abbildung 5
Bifaciale PV-Module
vor weißem Hinter-
grund an der Fassade
des ISFH-Gebäudes

Innovative Solarzellenrückseite für hohe Wirkungsgrade – Laser-Fired Contacts

Voraussetzung zur Erzielung hoher Solarzellenwirkungsgrade ist eine sehr gute Passivierung der rückseitigen Oberfläche sowie möglichst kleine Kontaktflächen, um die Rekombination der lichterzeugten Ladungsträger zu reduzieren. Zur Oberflächenpassivierung werden dielektrische Schichten aus Siliciumoxid oder Siliciumnitrid aufgebracht. Um Kontaktöffnungen in diese Isolatorschichten einzubringen, wird bei den bisherigen Labor-Höchsteffizienz-Solarzellen aufwändige Photolithografiertechnik verwendet, die für eine industrielle Produktion nicht geeignet ist. Am Fraunhofer ISE wurde das sogenannte Laser-Fired-Contacts (LFC)-Verfahren entwickelt. Mit diesem Verfahren kann ohne Öffnung der Passivierungsschicht eine ideale Rückseite mit nur drei Prozessschritten hergestellt werden [5]:

1. Passivierung (SiO_2 , SiN)
2. ganzflächige Metallisierung (Al)
3. Laserfeuern der Punktkontakte

Diese Anordnung ist in *Abb. 6* dargestellt. Es wurde ein automatisiertes Pilotlinien-Laser-

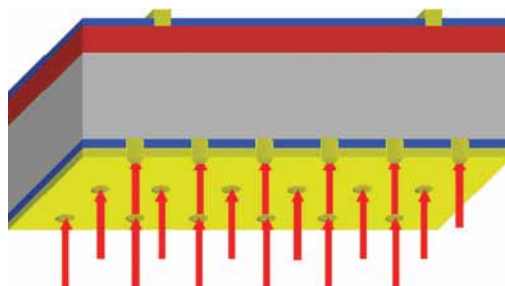


Abbildung 6
Innovative Solarzellen-
rückseite: Laser-Fired
Contacts (LFC)

system (Nd-YAG) aufgebaut, mit dem auf einer $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ Solarzelle 10000 LFC-Punkte in ca. 1 Sekunde prozessiert werden können. Die Ablenkung des Laserstrahls erfolgt über ein sehr schnelles Spiegelsystem. Der beste bisher mit der LFC-Methode erreichte Solarzellen-Wirkungsgrad liegt bei 21,3%.

Durch den Laserprozess wird unter anderem die Wirksamkeit der Aluminium-Rückkontakte verbessert, was insbesondere bei niedrigen Dotierkonzentrationen von großem Vorteil ist [6]. Eine weitere Maßnahme zur Kostensenkung von Solarzellen stellt die Verwendung von dünnen Siliciumscheiben dar, um damit teures Halbleitermaterial einzusparen. Hierbei ist zur Erzielung hoher Wirkungsgrade eine gute Rückseitenpassivierung von besonderer Bedeutung. Allerdings ist es mit der momentan üblichen Siebdrucktechnologie nicht möglich, sehr dünne Wafer zu prozessieren, da es hierbei zu einer starken Verbiegung der Wafer kommt. Mit der am Fraunhofer ISE patentierten LFC-Technologie gelang es hingegen, sowohl auf $90\text{ }\mu\text{m}$ dickem industriellen Czochralski-Siliciumsubstrat als auch auf $50\text{ }\mu\text{m}$ dickem zonengezogenem Silicium, Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 20% herzustellen. Diese dünnen Zellen zeichnen sich durch höhere Biegsamkeit aus und können deshalb auch gekrümmten Oberflächen angepaßt werden.

Schlussfolgerung

Es wurden neuartige Solarzellenstrukturen entwickelt, bei denen Hocheffizienzmerkmale mit einfachen und kostengünstigen Herstellungsverfahren verknüpft sind. Mit diesen schon teilweise automatisierten Produktionsanlagen wird gezeigt, dass unter ökonomisch und ökologisch vertretbaren Bedingungen in einem industriellen Prozess Wirkungsgrade über 20% möglich sind. Mit einer neuen Rückseitenkonfiguration wurde – selbst für sehr dünne Silicium-Solarzellen – die Erreichbarkeit dieser hohen Wirkungsgrade aufgezeigt. Damit dürften diese innovativen Solarzellenstrukturen zu den aussichtsreichen Kandidaten gehören, die mittelfristig einen bedeutenden Beitrag zur Kostensenkung des Solarstromes leisten können.

Literatur

- [1] J. Bernreuter, Photon 5/2003 und Photon International 5/2003, Solar Verlag GmbH, Aachen
- [2] R. Hezel, Solar Energy Materials and Solar Cells 74 (2002), S. 25-33
- [3] J. W. Mueller, A. Merkle and R. Hezel, Proc. 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan 2003
- [4] R. Hezel, Progress in Photovoltaics 12, 01/2004
- [5] E. Schneiderlöchner, R. Preu, R. Lüdemann und S. W. Glunz, Progress in Photovoltaics 10, 29-34, 2002
- [6] S. W. Glunz, A. Grohe, M. Hermle, E. Schneiderlöchner, J. Dicker, R. Preu, H. Mäckel, D. MacDonald and A. Cuevas, Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003