



Mit neuem Verfahren näher an die ideale Solarzelle

Beidseitig kontaktierte monokristalline Silizium-Solarzelle erreicht Wirkungsgrad von 25,7 Prozent



Das Ziel von Entwicklern und Kunden sind Solarzellen, die dem theoretisch maximal erreichbaren Wirkungsgrad möglichst nahe kommen. Und diese Zellen sollen dann auch noch kostengünstiger herstellbar sein. Forscher am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE untersuchten, mit welchen Methoden und Verfahren sie den Wirkungsgrad der Zelle steigern und innere Verluste reduzieren können. Diesen Vorgaben entsprechend entwickelten sie eine beidseitig kontaktierte, monokristalline Silizium-Solarzelle. Diese erreicht einen Wirkungsgrad von 25,7 %.

Durch eine Reduzierung der Verlustmechanismen lässt sich der Wirkungsgrad von Silizium-Solarzellen steigern. Die Forscher untersuchten, wie sie die Verluste senken, die durch Rekombination von Ladungsträgern entstehen, und wie sie die Lichteinkopplung verbessern können. Ihr Ziel ist es, hocheffiziente Zellen mit weniger aufwendigen Verfahren und weniger Prozessschritten als bisher herzustellen.

Dr. Martin Hermle, Leiter der Abteilung Hocheffiziente Silizium-Solarzellen am Fraunhofer ISE, erklärt den Ansatz: „Bisher wurden zur Steigerung des Wirkungsgrads von Solarzellen immer komplexere Solarzellenstrukturen verwendet. Im Vergleich mit den momentan genutzten hocheffizienten Solarzellenstrukturen vereinfachen wir den Herstellungsprozess und erhöhen dennoch die Effizienz der Solarzellen.“

Hochleistungs-Labor-Solarzellen aus kristallinem Silizium kratzen beim Wirkungsgrad inzwischen an der 27-Prozent-Marke – eine ideale Silizium-Solarzelle erreicht theoretisch 29 %. Dies bedeutet, dass sie 29 % der gesamten Energie im Sonnenspektrum, vom ultravioletten Licht bis hin zu langwelliger Wärmestrahlung, in elektrische Energie umwandelt. In der Praxis entstehen die bedeu-

Dieses Forschungsprojekt wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

tendsten Wirkungsgradverluste durch Rekombination von Ladungsträgern, durch die Metallisierung sowie durch optische Verluste.

Oberfläche, Rückseite und Kontakte optimieren

Zur Reduzierung der Wirkungsgradverluste geht es darum, Rekombination von Ladungsträgern zu vermeiden und freie Ladungsträger möglichst verlustfrei zu übertragen. Ebenso ist es das Ziel, Licht optimal einzukoppeln und zu nutzen. Dafür sollen Verschattung durch (Front-) Kontakte, Verluste durch Reflexion sowie Wiederaustreten des Lichts aus dem Siliziumwafer minimiert werden. Zur Effizienzsteigerung entwickelten die Forscher neue Technologien und Prozesse, mit denen sich Oberfläche, Rückseite und Kontakte der Zelle optimieren lassen. Hier kurz zusammengefasst die Handlungsschwerpunkte, die im Folgenden genauer ausgeführt werden:

- Eine gut leitende Emitterschicht sammelt freie Ladungsträger und leitet sie möglichst verlustfrei aus der Zelle an die Metallkontakte weiter.
- Neue passivierende Kontakte transportieren den Strom der Solarzelle möglichst verlustfrei ab. An diesen neuen Kontakten ist die Ladungsträger-Rekombination geringer als bei den bisherigen selektiven Emittoren und lokalen BSFs.
- Neue multifunktionale Oberflächenschichten haben verbesserte optische und elektrische Eigenschaften; eine neue dielektrische Rückseitenpassivierung verbessert zugleich die Lichteinkopplung.

Effizientere Solarzellen einfacher herstellen

Ziel des Projektes ForTES war es, neue Technologien zur Effizienzsteigerung von Silizium-Solarzellen der nächsten Generation zu untersuchen. Die Forscher erreichten den höchsten Wirkungsgrad für Silizium-Solarzellen mit Metallkontakten auf Vorder- und Rückseite durch eine neue, ganzflächig selektive und passivierende Kontaktierung. Damit konnten sie zum Weltrekord für rückseitenkontaktierte Silizium-Solarzellen aufschließen, bei denen die Vorderseite nicht durch Kontaktfinger verschattet wird, die den Wirkungsgrad mindern.

Die im Projekt entwickelten Technologien sollen für einfache Zellstrukturen höhere Wirkungsgrade ermöglichen und für n- und p-Typ-Silizium verwendbar sein. Sie sollen sowohl evolutionär zur Verbesserung aktueller Technologielinien als auch für neue Zellkonzepte wie die Heterojunction-Technologie nutzbar sein.

Bei hocheffizienten Zellstrukturen limitieren die metallischen Kontakte auf der Rückseite den Wirkungsgrad. Deshalb wird bei den sogenannten Passivated-Emitter-and-Rear-locally-Contacted-Zellen (PERC-Zellen) die Kontaktfläche auf der Rückseite auf tausende punktförmige Kontakte minimiert. PERC-Zellen erreichen mittels einer dielektrischen Oberflächen-Passivierung und einer Reduzierung der metallisierten Fläche höhere Spannungen als herkömmliche Zellen mit einer ganzflächigen Metallisierung auf der Rückseite. Doch zugleich steigt der Serienwiderstand, da die Ladungsträger einen weiteren Weg innerhalb des Siliziums zurücklegen müssen (Abb. 1).

Diesen Zielkonflikt umgeht der im Projekt entwickelte ganzflächige, selektive Kontakt. Dieser Tunneloxid-Kontakt unterdrückt einerseits die Rekombination von Ladungsträgern am Metallkontakt, zugleich lässt er einen verlustfreien Transport der Majoritätsladungsträger zu (Abb. 2).



Abb. 1 Die Simulation verdeutlicht den Unterschied des Stromtransports in Solarzellen mit lokaler Rückseiten-Kontaktierung (links) und in Zellen mit dem neuen ganzflächigen, passivierten TOPCon-Rückseitenkontakt (rechts).

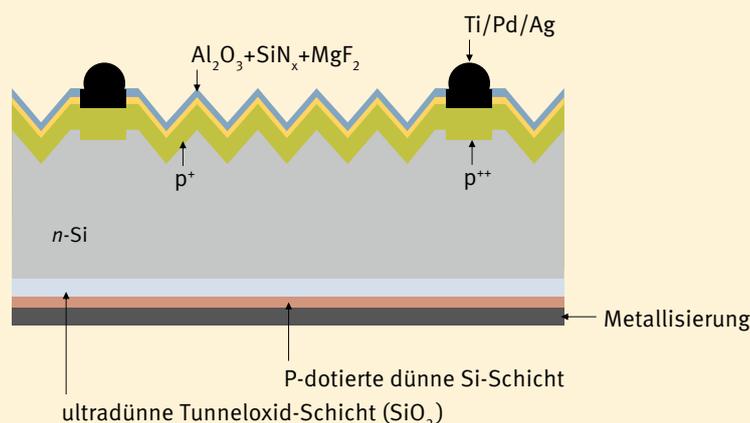


Abb. 2 Schema der TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) Solarzelle mit ganzflächigen selektiven Kontakten.

Innovation Tunneloxid-Rückseitenkontakt

Mit einem neuen Verfahren optimieren die Forscher den Ladungsträger-Transport in der Solarzelle und sparen bisher nötige Bearbeitungsschritte ein. Bei der sogenannten Tunnel-Oxide-Passivated-Contact-Technik (TOPCon-Technik) entfällt die bei Zell-Technologien wie PERC erforderliche Strukturierung beziehungsweise punktförmige Kontaktierung der Rückseite. Die neue Rückseitenkontaktierung besteht aus dem ultradünnen Tunneloxid und einer dünnen Siliziumschicht.

Für diese neue Kontaktierung bringen die Wissenschaftler auf der Rückseite der Si-Zelle vollflächig einen ultradünnen Tunneloxid-Rückseitenkontakt auf. Die Siliziumoxid-Passivierungsschicht ist nur ein bis zwei Nanometer stark. Diese Barrierschicht können die Ladungsträger mittels quantenmechanischer Tunnelprozesse überwinden. Auf dieses Tunneloxid wird flächendeckend eine dünne Schicht aus hochdotiertem Silizium abgeschieden.

Hermle erklärt: „Damit haben wir einen der bestimmenden Verlustmechanismen in Silizium-Solarzellen, die Rekombination der Ladungsträger an den Metallkontakten, in den Griff bekommen. Der neue, ganzflächige passivierte Kontakt leitet die Majoritätsladungsträger nahezu verlustfrei weiter, zugleich verhindert er, dass die Ladungsträger an den Metallkontakten rekombinieren und damit nicht mehr zum Strom beitragen können.“

Die Forscher entwickelten diese Zellen mit Blick darauf, wie sich Produktionsverfahren effektiver und einfacher gestalten lassen.

Texturierung verbessert Lichteinkopplung

Je größer der Anteil der einfallenden Strahlung ist, den die Solarzelle in elektrische Energie wandeln kann, umso höher ist der Zell-Wirkungsgrad. Strukturen im Mikro- oder Nanometermaßstab helfen in Solarzellen, das Licht einzufangen und optimal zu nutzen. Kristalline Silizium-Solarzellen absorbieren Licht im nahen Infrarot zwischen 900 und 1.200 nm nur sehr schwach. Diffraktive Strukturen auf der Solarzellenrückseite beugen und streuen das einfallende Licht und können die Absorptionsverluste minimieren. Eine Oberflächentextur reduziert die Vorderseitenreflexion und



Silizium-Solarzellen

Heute werden die meisten Silizium-Solarzellen aus p-Typ-Material hergestellt. Dies bedeutet, dass die Basis der Solarzelle positiv leitend ist. Auf die Zelle wird eine dünne, negativ leitende Schicht aufgebracht, der sogenannte Emitter; dieser sammelt die Ladungsträger. Ist die Solarzellenbasis negativ leitend, handelt es sich um n-Typ-Solarzellen.

Die Silizium-Zelltechnologie entwickelt sich in schnellen Zyklen: Während der Projektlaufzeit fand in der Industrie der Übergang der Al-BSF (Aluminium-Back Surface Field / Rückseitenfeld) Technologie hin zur PERC Technologie (Passivated-Emitter-and-Rear-locally-Contacted-Zellen) statt. Aktuell liegt der Wirkungsgrad monokristalliner PERC Industriesolarzellen bei über 22 %. Die noch effizientere Si-Heterojunction (SHJ)-Technologie wird inzwischen als industriereif beurteilt. Eine Hochleistungszelle, die dieses Schichtsystem nutzt, erzielte einen neuen Weltrekord-Wirkungsgrad für Silizium-Solarzellen von 26,7 % (IBC von Kaneka). Bei SHJ-Zellen wird auf beiden Waferseiten der ladungstrennende pn-Übergang durch dotierte nanometerdünne Schichten aus amorphem Silizium (a-Si) bzw. dem optisch transparenteren nano-kristallinen (nc) SiO_x erzeugt. Die Metallkontakte werden auf die transparenten, leitfähigen Oxid-Schichten aufgebracht. Mit Tandem- oder Mehrfach-Solarzellen werden deutlich höhere Wirkungsgrade möglich. Fraunhofer ISE erreichte 31,3 % für eine vollständig integrierte Mehrfachsolarzelle auf Silizium-Basis.

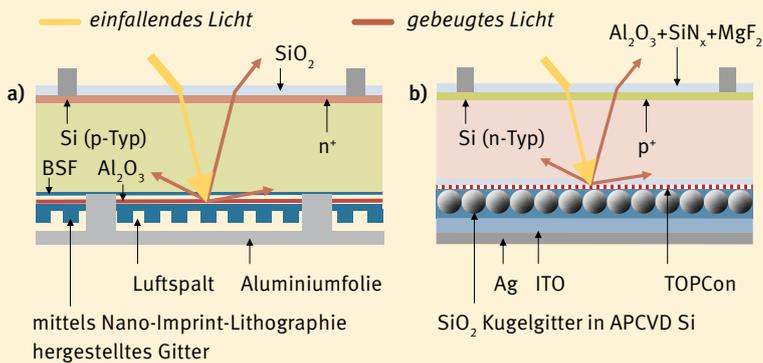


Abb. 3 EPOS Solarzellen mit diffraktiven Rückseitengittern: (a) p-Typ Zelle mit dünner Al_2O_3 Rückseitenpassivierung und einem binären Kreuzgitter in a-Si. (b) n-Typ Zelle mit passiviertem Rückseitenkontakt (TOPCon) und einem Kugelgitter auf der Rückseite. Vollflächiger Rückseitenkontakt (ITO/Silber).

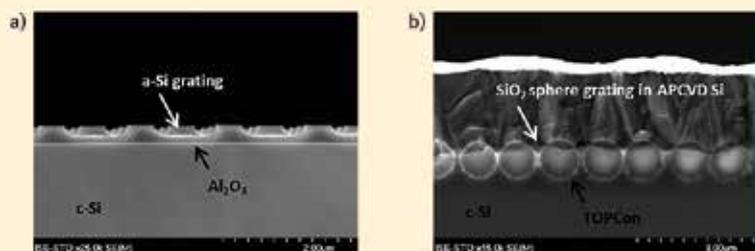


Abb. 4 REM-Aufnahmen der Querschnitte durch EPOS-Zellen: links das mittels Nano-Imprint-Lithographie hergestellte Kreuzgitter, rechts mittels SiO_2 -Kugel realisierte Struktur auf TOPCon (jeweils ohne Metallisierung).

verlängert die Lichtwege im Silizium. Neue Konzepte zum Lichteinfang (Lighttrapping) kombinieren häufig Texturen mit unterschiedlichen Strukturdimensionen, beispielsweise eine pyramidale Vorderseite und ein Rückseitenbeugungsgitter.

Um ideale Texturkombinationen an Vorder- und Rückseite von Solarzellen zu bestimmen, entwickelten die Fraunhofer-Forscher die OPTOS-Methode. Mit dieser lassen sich Reflexion und Absorption von Solarzellen mit beidseitig beliebig strukturierten Oberflächen simulieren und optimieren. Es zeigte sich, dass mit zwei verschiedenen diffraktiven Rückseitengittern – hexagonale Kugelgitter und binäre Kreuzgitter – die Absorption im nahen Infrarot steigt.

EPOS-Zellen: Elektrisch planar, optisch strukturiert

Die Forscher stellten hocheffiziente Solarzellen mit solchen diffraktiven Rückseitenstrukturen her: zum einen auf n-Typ Silizium basierende TOPCon-Solarzellen mit einem vollflächigen passivierten Kontakt und einem hexagonalen Kugelgitter auf der Rückseite; zum anderen auf p-Typ Silizium basierende EPOS-Solarzellen mit einem binären, mittels Nanoimprint-Lithographie hergestellten Rückseitengitter und einer Aluminiumfolien-basierten Kontaktierung (Abb. 3). Diese sogenannten EPOS-Zellen fangen das Licht sehr effizient ein. Die Forscher bezeichnen sie als elektrisch flach, aber optisch rau, weil die Zellrückseite plan und sehr gut elektrisch passiviert und gleichzeitig optisch strukturiert ist. Damit können sowohl hohe Spannungen als auch hohe Ströme und somit hohe Wirkungsgrade erreicht werden.

Bei der n-Typ-Zelle wurde die Rückseite mittels TOPCon passiviert. Zur Verbesserung der Optik wurde hier eine Lage von 1 μm dicken SiO_2 -Kugeln aufgebracht, anschließend mittels APCVD eine $\mu\text{-Si}$ Matrix abgeschieden. Eine TCO-Schicht (Transparent Conductive Oxide) trennt die Metallisierung und die raue $\mu\text{-Si}$ Schicht.

Bei der p-Typ-Zelle wurde die Rückseite mittels einer etwa 5 nm dünnen Al_2O_3 Schicht passiviert. Darauf wurde dann eine zirka 300 nm dicke a-Si

Schicht aufgesputtert. Diese Schicht erhält ein mittels Nanoimprint-Lithographie erzeugtes Kreuzgitter. Auf diese strukturierte a-Si Schicht kommt Al-Folie als Kontaktierung, diese wird mittels Laser lokal verschweißt. Zwischen dem Si-Gitter und der flachen Metallschicht befindet sich nun ein Luftspalt. Das ist gut für die Lichteinkopplung, denn es ermöglicht einen hohen Brechungsindexsprung. Abbildung 4 zeigt REM Aufnahmen der jeweiligen Rückseitenstruktur.

Die EPOS-Zellen eignen sich für Silizium-basierte Tandem-Konzepte, bei denen keine Vorderseitentextur eingesetzt werden kann sowie für sehr dünne c-Si-Solarzellen. In Kombination mit texturierten Vorderseiten waren die Stromgewinne durch die Rückseitenstrukturen deutlich geringer.

Silizium-Solarzellen weiterentwickeln

Die entwickelte TOPCon Technologie kann ein wichtiger Baustein für die evolutionäre Weiterentwicklung der Si-Solarzellen Technologie sein. Aktuell werden die Prozesse auf industrietaugliche Anlagen übertragen und Wirkungsgrade über 24,5 % auf 100 cm^2 Fläche gezeigt. Die erreichten Wirkungsgradsteigerungen zeigen, dass die Technologieentwicklung noch nicht am Ende ist. Dadurch wird es zu einer weiteren Reduzierung der Stromgestehungskosten der PV durch Verringerung der Prozesskosten und Erhöhung des Wirkungsgrades kommen. Die Forscher betonen: Bei der technologischen Entwicklung sollte großer Wert auf eine industrielle Umsetzbarkeit der einzelnen Prozessschritte gelegt werden.



Wege zu günstigen Hochleistungs-Zellen

Forschungseinrichtungen und Hersteller verbessern aktuelle Zellkonzepte und entwickeln neue Technologien und Verfahren. Mit dem Ziel, die Leistung zu steigern und die Herstellung zu optimieren, verfolgen sie recht unterschiedliche Ansätze. Zwei Schwerpunkte sind PERC- und Heterojunction-Zellen.

Als Weiterentwicklung der PERC-Technologie haben bifaziale PERC+ Solarzellen auf der Rückseite statt der ganzflächigen Aluminium-Metallisierung ein Aluminium-Finger-Grid. Dadurch kann die Zelle auf der Rückseite einfallendes Streulicht ebenfalls absorbieren und in Strom umwandeln. Module mit PERC+ Solarzellen können etwa 5 bis 10 % mehr elektrische Energie erzeugen als konventionelle monofaziale Module.

Neue Hochleistungs-Industriezellen sollen mit einer neuen Draht-Folien-Elektrode verbunden werden. Mit dieser sogenannten Smart-Wire-Verbindungstechnik lassen sich etwa zwei Drittel des üblichen Silbereinsatzes einsparen. Das verringert die Ladungsträgerrekombination an der Zellvorderseite und verbessert die Lichteinkopplung.

Heterojunction-Zellen

Heterojunction-Solarzellen erreichen hohe Wirkungsgrade bei vergleichsweise geringen Produktionskosten. Sie kombinieren die Vorteile von c-Si-Solarzellen mit denen von Dünnschichttechnologien. Die ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaics) erwartet für sie in den nächsten Jahren einen langsam aber ständig wachsenden Marktanteil.

Zur weiteren Verbesserung der Optik von Heterojunction-Solarzellen stellten Forscher des Helmholtz-Zentrums Berlin und des Forschungszentrums Jülich einen transparenten Kontakt aus SiO₂ und dotiertem mikrokristallinem Siliziumkarbid (μc-SiC:H) her.

Im Jahr 2016 bewilligte das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für 166 neue Projekte der Photovoltaikforschung über 116 Millionen Euro, insgesamt flossen in dem Jahr über 154 Millionen Euro in die weitere Entwicklung der Photovoltaik.

Projektbeteiligte

» **Projektleitung:** Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg,
Dr. Martin Hermle, martin.hermle@fraunhofer.ise.de

Links

» Herstellung von Solarzellen mit Heterojunction Technologie, <https://youtu.be/GEgaV0aFBsg>

Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Solarzellen günstiger produzieren. BINE-Projektinfo 2/2017
- » Solarzellen mit Laser bearbeiten. BINE-Projektinfo 8/2015
- » Hocheffiziente Solarzellen und Module entwickeln. BINE-Projektinfo 10/2013
- » Photovoltaik-Innovationen. BINE-Themeninfo II/2011
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter www.bine.info/Projektinfo_13_2017

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter www.bine.info/abo

Impressum

Projektorganisation
Bundesministerium
für Wirtschaft und Energie (BMWi)
11019 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Sven Macko
52425 Jülich

Förderkennzeichen
0325292

ISSN
0937-8367

Herausgeber
FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut
für Informationsinfrastruktur GmbH
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Autor
Gerhard Hirn

Urheberrecht
Titelbild: Singulus Technologies AG
Abb. 1–4: Fraunhofer-Institut für
Solare Energiesysteme ISE
Eine Verwendung von Text und
Abbildungen aus dieser Publikation ist
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion
gestattet. Sprechen Sie uns an.

Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?
Wir helfen Ihnen weiter:

0228 92379-44
kontakt@bine.info

BINE Informationsdienst
Energieforschung für die Praxis
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185-197
53113 Bonn
www.bine.info

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages