



Neuerungen bei Solarzellen und Modulen

Dynamische Branche

ALS ANTWORT AUF DIE Herausforderungen des Photovoltaik-Marktes, arbeitet die Energieforschung an verschiedenen Lösungen. Schon jetzt zeichnen sich eine ganze Reihe von Innovationen ab, die in den nächsten Jahren Realität werden können.

Wachstumsraten der Photovoltaikindustrie von jährlich etwa 30% lassen erwarten, dass der Anteil weiterhin steigen wird. In 2004 wurde weltweit bereits ein Gigawatt Solarstromleistung produziert, die Marke 10 Gigawatt scheint noch vor 2020 erreichbar. Soll mit Photovoltaik in energie-wirtschaftlich relevanter Dimension Strom erzeugt werden, dann müssen die Fertigungskapazitäten weltweit stark aus-geweitet werden.

Deutschland könnte von dieser Entwicklung profitieren und hier seine Technologiekompetenz ausspielen. Die Kosten für Photovoltaik-Anlagen konnten in den letzten 15 Jahren um mehr als Faktor zwei, die Kosten für Solarmodule um etwa den Faktor vier sinken – eine Erfolgsstory für die den Markt beherrschenden Silizium-Wafer-Solarzellen. Aus Kostengründen und wegen knapper Fertigungskapazitäten zur Herstel-lung von Silizium geht es kurzfristig um optimierte Solarzel-len, die höchste Leistung pro Gramm Silizium erreichen. Mit-telfristig sind alternative Materialien und Solarzellenkonzepte gefragt, die sich in großen Einheiten kostengünstig in Durch-

laufprozessen fertigen lassen. Solarzellen aus kristallinem Silizium nutzen das häufigste Element der Erdkruste und ba-sieren auf einer relativ einfachen Technologie. Die klassischen Solarzellen haben sich mit einem Marktanteil von mehr als 90% durchgesetzt. Mit den aktuellen Technologieinnovationen werden effiziente Fertigungsprozesse im Gigawatt-Maß-stab vorbereitet. Gleichzeitig sollen die Kosten weiter ge-senkt werden, indem die Leistungsausbeute pro Gramm Si-lizium deutlich gesteigert wird. Die notwendigen Prozess-schritte werden zum Verständnis der weiteren Ausführungen hier kurz erläutert.

Herstellung klassischer Solarzellen

Wafer-Konzept: Das Silizium wird in stark gereinigter Form eingeschmolzen und erstarrt anschließend je nach Kristallisa-tionsverfahren als Einkristall (monokristallines Silizium) oder als Festkörper mit Bereichen verschiedener Kristallorientie-rung (polykristallines Silizium). Geschnitten in quadratische

Scheiben von typischerweise 100 mm bis 210 mm Kantenlänge und 0,2 mm bis 0,3 mm Dicke, den so genannten Wafern, ist es Ausgangsmaterial für die Herstellung kristalliner Silizium-Solarzellen.

Reinigung: Der Silizium-Wafer wird von allen Seiten angeätzt und gereinigt. Dabei wird der oberflächennahe Bereich, der durch das Schneiden des Siliziums in Wafer geschädigt wurde, entfernt.

Absorption maximieren: Gleichzeitig kann bei geeigneter Ätzung eine Oberflächentextur erzeugt werden. Bei monokristallinen Wafern entstehen beim Einsatz einer Ätzlösung aus Natron- oder Kalilauge gemischt mit Isopropylalkohol auf der Waferoberfläche zufällig verteilte Pyramiden. Für polykristalline Wafer mit Oberflächenbereichen, die in verschiedene Richtungen orientiert sind, werden zurzeit Ätzprozesse mit Flusssäure- und Salpetersäuregemischen entwickelt. So entstehen unabhängig von der Kristallorientierung stochastische Oberflächenstrukturen.

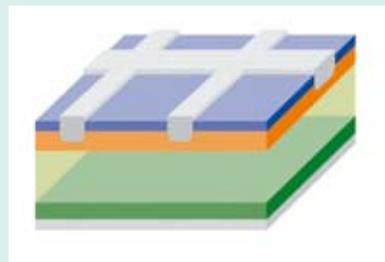
p-n-Übergang: Nach der nasschemischen Ätze und Reinigung wird Phosphor bis in eine Tiefe von etwa einem halben bis einem Mikrometer in den Wafer diffundiert. Dazu wird der Wafer in einem Ofen bei 800 °C bis 1000 °C einer phosphorhaltigen Atmosphäre ausgesetzt. Die mit Phosphor durchsetzte (dotierte) Siliziumschicht ist im Gegensatz zum positiv leitfähigen Ausgangswafer (p-Basis) negativ leitfähig (n+-Emitter). Die Solarzelle weist nun einen so genannten pn-Übergang

auf, der für die Trennung der durch Licht erzeugten Ladungsträger verantwortlich ist.

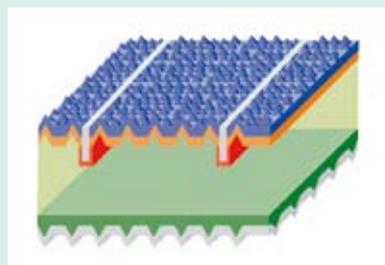
Zwischenschritte: Bei der Diffusion bildet sich auf dem Wafer eine Oxidschicht, welche durch eine Flusssäurebehandlung entfernt werden muss. Außerdem findet die Diffusion an allen phosphorexponierten Stellen des Wafers statt, so dass in der Regel der Emitter auch über die Kanten bis zur Rückseite reicht. Um einen Kurzschluss in der Solarzelle zu vermeiden, müssen diese Emitterbereiche entfernt oder vom Emitter auf der Vorderseite getrennt werden. Dies geschieht in der Regel durch Ätzen der Kanten in einem Plasma.

Reflexion minimieren: Vor der Kontaktierung der beiden Pole des p-n-Übergangs wird die Vorderseite mit einer Antireflexschicht (ARC), meist aus Siliziumnitrid, vergütet.

Guter Kontakt: Schließlich werden auf Vorder- und Rückseite Metallkontakte aufgedruckt; hinten aus Aluminium als eine ganzflächige Schicht und vorne aus Silber in Form von dünnen Fingern, um möglichst wenig Lichtabschattung durch die Kontakte zu erhalten. Die Kontaktierung selbst erfolgt in einem Schritt bei Temperaturen um 800 °C. Dabei sintert das Silber durch die ARC und kontaktiert den Emitter, während sich gleichzeitig das Aluminium auf der Rückseite mit dem Silizium vermischt und eine hoch dotierte positive Oberflächenschicht erzeugt (Back Surface Field, BSF), was die Verluste an der Solarzellenrückseite reduziert. Solarzellen aus Silizium-Wafern zeichnen sich im Vergleich zu anderen Solarzellen



Schema einer konventionellen Silizium-Solarzelle, in der Struktur wie sie heute in großen Stückzahlen produziert wird



Saturn-Solarzelle: Per Laserschnitte eingebrachte Gräben lassen die Frontkontakte „in der Versenkung verschwinden“

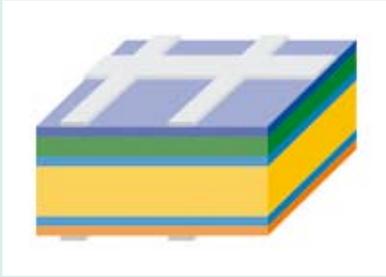
durch relativ hohe Wirkungsgrade, also hohe Leistungsausbeuten pro Fläche, aus. Auf diese Weise industriell produzierte Solarzellen wandeln Sonnenlicht in elektrischen Strom mit einer Effizienz von 15% (polykristalline Solarzellen) bzw. 16,5% (monokristalline Solarzellen).

Optimierte Solarzellen

Höhere Effizienzen erreichen Solarzellen mit ausgefeilteren Strukturen. Beispielsweise haben die Saturn-Solarzellen von BP Solar geringere Abschattungsverluste, weil die Frontkontakte „vergraben“ werden. Per Laser werden Vertiefungen geschnitten, in denen der Frontkontakt chemisch abgeschieden wird. Damit werden Wirkungsgrade in der Produktion von über 17% erreicht. Bei der HIT-Solarzelle von Sanyo wird das sehr gute Absorptionsvermögen und die passivierende Wirkung des amorphen Siliziums mit den guten elektronischen Eigenschaften von monokristallinem Silizium kombiniert. Der Emitter besteht aus einer sehr dünnen amorphen Silizium-Schicht, während die Basis aus einem (negativ leitenden) monokristallinem Silizium-Wafer besteht. In der Produktion erreichen die nur 200 µm dicken Solarzellen gut 18,5% Wirkungsgrad. Auch die A-300-Solarzellen von SunPower basieren auf einem negativ leitenden Silizium-Wafer. Hier ist allerdings der Emitter auf der Rückseite diffundiert und alle Kontakte auf der Rückseite angeordnet, so dass es auf der Vorderseite zu keiner Abschattung durch Metallbahnen kommt (so genannte Rückseitenzellen). In der Pilotlinie von SunPower werden Wirkungsgrade von über 21% erreicht.

Am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) verfolgt man ein Konzept, welches gleichfalls die Abschattung durch Frontkontakte minimieren will. Durch schräges Aufdampfen entstehen auf den Flanken von Gräben elektrische Kontakte, die den Lichteinfall praktisch nicht mehr behindern. Im Labor wurden bereits Wirkungsgrade über 20% erzielt.

Auch mit dem Solarzellenkonzept des Fraunhofer ISE werden Wirkungsgrade jenseits der 20%-Marke erreicht – unter Verwendung industrietauglicher Techniken. Es basiert auf einem Rückseitenkontakt, der nur punktuell hergestellt wird, um den größten Teil der Rückseite mit einer Schicht aus ei-

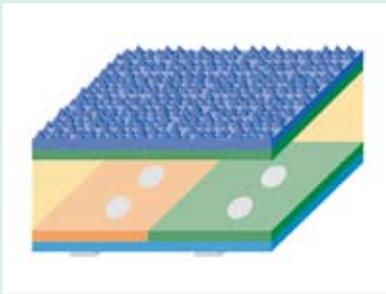


HIT-Solarzelle: Sandwich-Konstruktion mit einem kristallinen Silizium-Wafer zwischen zwei dünnen Schichten aus amorphem Silizium

- Metallkontakte
- Oxid oder Antireflexschicht
- n⁺ Emitter
- n⁺⁺ Lokaler Emitter
- p-Basis
- n-Basis
- Back Surface Field BSF/p⁺
- Sonderschichten

ner dielektrischen Siliziumverbindung (Siliziumoxid, -nitrid oder -carbid) zu vergüten. Dies führt zu besseren Ergebnissen als ein ganzflächiges Aluminium-Rückseitenfeld und kann gleichzeitig auf sehr viel dünneren Wafern verwendet werden, welche sich bei ganzflächiger Aluminiumbeschichtung stark verbiegen würden.

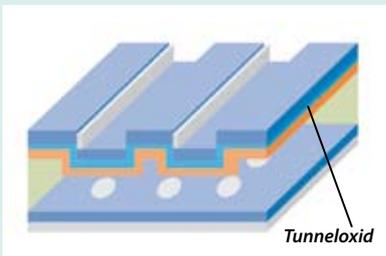
Bei allen beschriebenen optimierten Solarzellenkonzepten werden monokristalline Silizium-Wafer verwendet, mit teils hohen Ansprüchen an die Materialqualität. Bei manchen Konzepten kommt man nicht ohne aufwändige und teure Verfahrensschritte aus. Die Konzepte sind meist (noch) nicht auf die kostengünstigeren multikristallinen Silizium-Wafer übertragbar.



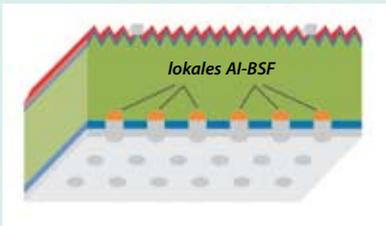
Rückseitenzelle: Auf der Rückseite wechseln sich Basis- und Emitterbereiche ab und können kontaktiert werden. Frontseitenkontakte entfallen

Auf zu neuen Solarzellenkonzepten

Um möglichst viel Licht in die Solarzelle zu bekommen, müssen auch die Vorderseitenkontakte möglichst klein sein. Damit steigt allerdings ihr elektrischer Widerstand. Vergrabene Kontakte oder das völlige Verlegen aller Kontakte auf die Rückseite sind mögliche Alternativen. Um die Kontaktierung der negativ dotierten Schicht (Emitter) auf die Rückseite zu führen, muss man sehr viele Löcher in den Wafer bohren. Bei der Diffusion werden die Flanken dieser Löcher dann ebenfalls zu Emittergebieten und der Emitter wird von der Rückseite erreichbar (Emitter-Wrap-Through, EWT). Dieses Verfahren ist allerdings sehr aufwändig. Alternativ kann man, wie bei der oben beschriebenen A-300, den Emitter auf der Rückseite diffundieren. Allerdings muss hier sehr hochwertiges und damit teures Silizium eingesetzt werden, um die Rekombination in der darüber liegenden, dem Licht zugewandten Basis zu begrenzen. Ein Mittelweg bietet das Metal-Wrap-Throug (MWT) Konzept: Lediglich die für die Verschaltung im Modul notwendigen Lötbahnen, welche einen großen Teil der metallisierten Fläche auf der Vorderseite ausmachen, werden auf die Rückseite verlegt und haben über in den Wafer gebohrte Löcher Verbindung zum Emitterkontakt auf der Vorderseite. Dieses Konzept stellt weniger Anforderungen an die Materialqualität als eine Rückseitenzelle und ist einfacher in der Herstellung als eine EWT-Zelle. Aus diesem Grund arbeiten verschiedene Solarzellenhersteller wie Shell Solar, Photovoltech, Sharp oder Q-Cells an diesem Ansatz.



OEKO-Solarzelle: MIS-n⁺p-Solarzelle mit mechanisch erzeugter Struktur. Frontkontakte werden ohne Masken schräg bedampft und bieten dem Licht wenig Widerstand



Solarzelle mit punktuellen Rückseitenkontakt: Durch eine dielektrische Schicht ist die Rückseite optimal passiviert. Die Kontaktierung erfolgt punktuell und mit lokalen BSF

Ausgangsmaterial

Eine Vollkostenrechnung für die Fertigung von Silizium-Solarzellen zeigt, dass der Silizium-Wafer den mit Abstand größten Kostenanteil ausmacht. Derzeit wird als Ausgangsstoff Silizium verwendet, welches von der Qualität den Ansprüchen der Mikroelektronik entspricht. Durch Vereinfachungen des Reinigungsverfahrens soll ein spezielles Solar-



80 µm dünner Wafer
mit Testsolarzellen

(Quelle: Fraunhofer ISE)



Industriell gefertigte 150 µm
Solarzelle

(Quelle: Deutsche
Cell)

Silizium gewonnen werden, welches bei geringerer Qualität und damit Herstellkosten auf die Ansprüche der Photovoltaik abgestimmt ist. Das Solarsilizium muss aber im Herstellungsprozess einer besonderen Behandlung unterzogen werden, um die vermehrt enthaltenen Störstellen soweit möglich zu inaktivieren, damit Ladungsträgerverluste aufgrund von Rekombinationseffekten minimiert werden.

Auch das Kristallisationsverfahren hat einen starken Einfluss auf die potenzielle Leistung und die Kosten eines Wafers. Monokristalline Wafer sind teurer als polykristalline, weil das Kristallisationsverfahren (Czochralski) aufwändiger ist und bei der Herstellung quadratischer Wafer aus den grundsätzlich runden Kristallen viel Material weggeschnitten wird. Da polykristalline Wafer aus quadratischen Säulen geschnitten werden, die wiederum aus quadratischen Blöcken stammen, bleibt weit weniger Material ungenutzt. Allerdings gehen auch hier 40 bis 50 % des Siliziums beim Sägen zu Wafers verloren. Wafer aus bandgezogenem Silizium sind hier im Vorteil: Beim EFG-Verfahren (edgedefined film-fed growth) wird ein achteckiges Silizium-Rohr direkt aus der Schmelze gezogen und anschließend per Laser in Scheiben geschnitten.

Das String-Ribbon-Verfahren basiert auf einem hydrostatischen Effekt: Zwischen zwei Drähten, welche durch flüssiges Silizium gezogen werden, bildet sich ein Silizium-Meniskus. Das Silizium erstarrt in Form eines Bandes, welches dann in Scheiben geschnitten wird. Auch beim RGS-Verfahren (ribbon growth on substrate) entsteht ein Band aus Silizium. Allerdings wird es hier erzeugt, indem ein Substrat unter einem

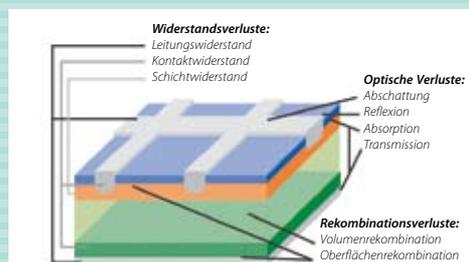
Tiegel mit flüssigem Silizium hinweg bewegt wird. So wird Silizium mitgezogen und kann dann kristallisieren. Doch bislang gilt: Je einfacher und damit kostengünstiger das Kristallisationsverfahren desto geringer ist die elektronische Qualität der Silizium-Wafer. Ein anderer Weg zur Kostenreduktion ist, den Wafer dünner zu machen, also weniger Silizium zu verwenden bei gleicher Fläche. Während die Standarddicke kristalliner Silizium-Wafer lange bei 330 µm lag, werden heute bereits vielfach 270 µm oder sogar 240 µm dicke Wafer eingesetzt und das Ziel ist, in Richtung 150 µm zu kommen. Im Labor ist dies bereits möglich, problematisch ist aber die Zerbrechlichkeit kristalliner Wafer.

Auch ist die Ausbeute beim Sägen und in der industriellen Weiterverarbeitung zu Solarzellen und -modulen noch unbefriedigend. Hier sind neue Fertigungsverfahren und eine angepasste Automatisierungstechnik gefordert. Außerdem verbiegen sich dünnere Solarzellen stark, wenn ein ganzflächiger Aluminiumrückseitenkontakt verwendet wird. Dies liegt an der unterschiedlichen Wärmeausdehnung der Materialien. Neue Kontaktverfahren sind also gefragt. Im Hinblick auf eine industrielle Serienfertigung im Gigawatt-Maßstab wird eine höchst effiziente Fertigungstechnik immer bedeutsamer. Hierfür werden auch neue Fertigungsschritte entwickelt wie die Plasma und PVD-Verfahren, Alternativen zur Nasschemie, der Einsatz von Lasern, die Entwicklung von Durchlaufprozessen und sehr schnelle Prozesse mit geringer Zykluszeit. So wurden z. B. Alternativen zur Kantenisolation mittels Plasmaätzen entwickelt.

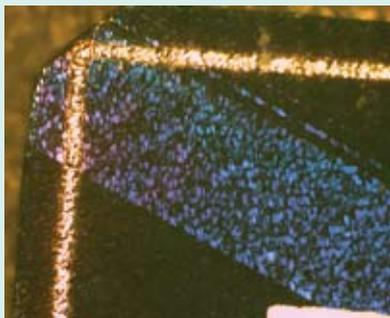
! Info

Verluste minimieren

Hohe Effizienzen kann man bei Solarzellen letztlich nur erreichen, indem die Verluste minimiert werden. Denn auch klassische Solarzellen (Silizium-Wafer + einfacher pn-Übergang) können theoretisch Wirkungsgrade bis über 30% erreichen. Optische Verluste, Verluste durch Rekombination der durch Licht erzeugten Ladungsträger sowie elektrische Wider-



standsverluste verhindern dies jedoch. Die gesamte Entwicklung zielt entsprechend darauf, Verluste zu verringern; doch die Maßnahmen wechselwirken teilweise kontraproduktiv – so kann eine Reduktion optischer Verluste zur Erhöhung elektrischer Verluste führen. Zur Verringerung von Reflexionsverlusten wird bereits bei konventionellen Solarzellen die Oberfläche texturiert. Allerdings ist damit eine Oberflächenvergrößerung verbunden, welche zu einer erhöhten Rekombination (= Vernichtung) von Ladungsträgern führt. Eine Oberflächenvergütung mit einer die Rekombination herabsetzenden (passivierenden) Schicht z. B. aus dielektrischen Siliziumverbindungen vermindert diesen Verlustmechanismus. Gleichzeitig absorbiert diese Schicht aber auch einen Teil des einfallenden Lichts - und zwar umso stärker, je besser die erwünschte Passivierung der Schicht ist.



Neue Produktionstechnik: Ein Lasergraben trennt Emitter und Basis

(Quelle: Fraunhofer ISE)

Auch wird ein Verfahren zum Ätzen der kompletten Rückseite erprobt, bei dem die Wafer über eine Ätzflüssigkeit schwimmen. Der Einsatz von Lasern bringt ebenfalls neue Möglichkeiten. Zukünftig werden Synergien mit Dünnschicht-Technologien aus der Dünnschicht-Photovoltaik aber auch der Glas- und Display-Industrie genutzt. So wird derzeit die Sputtertechnik, die sich für die großflächige Beschichtung von Architekturglas etabliert hat, an die Anforderungen der ARC-Beschichtung von Solarzellen angepasst.

Perspektiven

Um Rohstoffe einzusparen werden die Herstellung von dünneren Wafern und ihre Prozessierung zu Solarzellen untersucht. Auch werden immer größere Waferformate eingesetzt; der bisherige Standard $125 \times 125 \text{ mm}^2$ wird derzeit von dem Format $156 \times 156 \text{ mm}^2$ abgelöst und das neue Format $210 \times 210 \text{ mm}^2$ steht kurz vor der Einführung. Die Effizienz günstiger Siliziummaterialien und Prozesse kann gesteigert werden, z. B. mit Getter- und Passivierschritten zur Materialverbesserung. Auch die Oberfläche von multikristallinem Silizium könnte mit geeigneten Prozessen passiviert und texturiert werden.

Die Solarzellen der nächsten Generation werden sicherlich auch effizientere Kontaktstrukturen aufweisen. So wird an Feinliniensiebdruck und vergrabenen Kontakten, an der Kontaktierung großer dünner Wafer, neuartigen Rückseitenkontaktierungen und kompletten Rückseitenzellen gearbeitet. Die Entwicklung neuer Konzepte und Produktionstechniken in der Solarzellenfertigung zielt aber auch auf Verbesserungen in der Weiterverarbeitung.

Modulorientierte Solarzellenstrukturen, wie die erwähnten Rückseitenkontaktsolarzellen, aber auch übergreifende Ansätze integrierter Solarzellen-Modul-Konzepte werden zusätzlich Synergien der verschiedenen Wertschöpfungsschritte bringen. Das niederländische Forschungsinstitut ECN hat beispielsweise das Konzept der MWT-Zelle dahingehend erweitert, dass die Solarzellen bei der Modulverschaltung auf eine Art Leiterplatte mit Kontaktstiften aufgesteckt werden können.

! Info

BINE Informationsdienst

FIZ Karlsruhe, Büro Bonn
53129 Bonn
Tel. (02 28) 92 37 90
bine@fiz-karlsruhe.de
www.bine.info