

Dünnschicht-Solarzellen starten Aufholjagd (1)

H. Buers, Berlin

Der Photovoltaikmarkt verlangt Solarzellen mit besseren Wirkungsgraden und geringerem Siliziumverbrauch. Das führt bei der herkömmlichen Waferherstellung zu einem immer größer werdenden Produktionsaufwand und eröffnet der Dünnschicht-Technologie neue Chancen. Denn sie ermöglicht photovoltaische Halbleiterschichten, die nur noch wenige Mikrometer dick sind und deshalb weniger Rohstoff benötigen.

1 Zukunftstechnologie der Photovoltaik

Der zuvor strahlend blaue Himmel der Photovoltaik zeigte sich Ende 2005 erstmals leicht bewölkt. Die Branche bekam es mit einem Markt zu tun, auf dem eine enorm hohe Nachfrage auf ein begrenztes Angebot traf – begrenztes Angebot insofern, als Silizium nicht mehr in der benötigten Menge zur Verfügung gestellt werden konnte. Beide Faktoren – hohe Nachfrage und Siliziumknappheit – trieben die Preise steil nach oben. Die jährliche Degression der EEG-Einspeisevergütung zwang die Hersteller zwischenzeitlich zwar, die Preissteigerungen etwas zurückzunehmen. Ob und wann allerdings der Lieferengpass für Silizium verschwinden und der Preis dauerhaft auf ein niedrigeres Niveau sinken werden, steht in den Sternen. Viele Unternehmen sind jedenfalls der Überzeugung, dass eine siliziumfreie Solartechnologie mehr Zukunftschancen hat als konventionelle Lösungen. Diese Situation ließ Entwickler und Produzenten nach Alternativen suchen. Als Ergebnis hauchten sie einer PV-Technologie neues Leben ein, die wegen des geringen Wirkungsgrads der Zellen bislang kaum marktfähig schien: der Dünnschicht-Technologie. Heute gilt sie als eine der Zukunftstechnologien der Photovoltaik und man hofft, dass sie auf lange Sicht das sehr kostenintensive Silizium-Wafer-Verfahren ersetzen kann. Mehrere Unternehmen haben mittlerweile mit dem Bau von geeigneten Produktionsstätten für Dünnschicht-Solarzellen begonnen, einige produzieren bereits (Bild 1 a–c). Sie brauchen Unterstützung von der Wissenschaft – und bekommen sie auch: In Berlin entsteht zum Beispiel zur Zeit das „Kompetenzzentrum Dünnschicht- und Nanotechnologie für Photovoltaik“. Gemeinsam mit der Wirtschaft wollen das Hahn-Meitner-Institut Berlin (HMI), die Technische Universität Berlin (TUB), die WISTA Management GmbH sowie die TSB Technologiestiftung Innovationsagentur Berlin GmbH zukünftig

für einen schnelleren und kontinuierlichen Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie sorgen, mit der Absicht, Strom aus Sonnenlicht effektiver und kostengünstiger zu produzieren. Andere Institute und Entwicklungsabteilungen von Unternehmen verfolgen identische Ziele.

2 Typische Merkmale von Dünnschicht-Solarzellen

Ihre Daseinsberechtigung bezieht die Dünnschicht-Technologie in erster Linie aus dem verfahrensbedingten Vorteil, dass sie weniger Material und Energie benötigt als die konventionelle Siliziumwaferherstellung. Weitere Unterschiede zeigen sich unter anderem bei den elektrischen Eigenschaften.

2.1 Begriffe

Die bekannten Begriffe Zelle und Modul bezeichnen in der Dünnschicht-Technologie etwas anderes als in der kristallinen Silizium-Technologie. Eine Zelle ist in der Dünnschicht-Technologie ein langer schmaler Streifen Halbleitermaterial auf einem Trägerglas. Die vollständig beschichtete Glasscheibe mit mehreren in Reihe geschalteten Zellstreifen bildet das Rohmodul. Ist das Rohmodul mit einem Verbundmaterial verkapselt und zum Schutz mit einer zweiten Glasscheibe versehen, spricht man von einem Modul. Auch die übliche Unterscheidung zwischen Zell- und Modulwirkungsgrad lässt sich nicht ohne weiteres übertragen, weil Dünnschicht-Solarzellen nicht einzeln, sondern im Verbund produziert werden. Deshalb bezieht man den Wirkungsgrad auf die photovoltaisch aktive Fläche.

2.2 Genereller Aufbau und Produktionsprozess

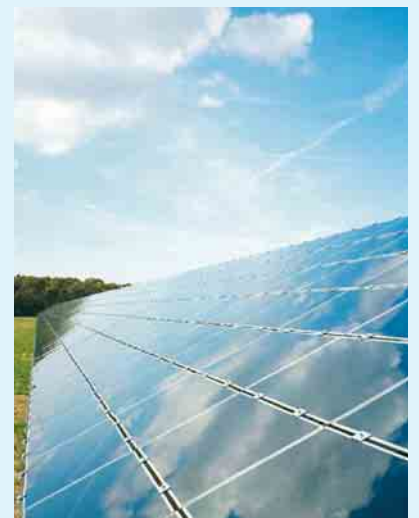
Die Verarbeitungstemperaturen liegen bei den meisten Dünnschichtverfahren zwischen 200 und 600 °C (Ausnahme: Dünnschichtzellen aus kristallinem Silizium mit einer Hochtemperatur-Siliziumabscheidung). Zum Vergleich: Die Herstellungstemperatur in der Wafertechnologie erreicht bis zu 1500 °C. Auch im Hinblick auf die Größengestaltung bieten Dünnschicht-Solarzellen Vorteile: Sie sind in ihrer



a) CIS-Photovoltaikmodule ersetzen Dachziegel
Foto: Würth Solar



b) Semitransparente Dünnschicht-Solarmodule aus amorphem Silizium-Glaselement
Foto: Schott Solar



c) Solarmodule aus Cadmium-Tellurid
Foto: Antec Solar Energy

1 Anwendungen mit Dünnschicht-Solarzellen

Autor

Hermann Buers ist freier Fachjournalist, Berlin.

Form nicht an standardisierte Wafergrößen gebunden, wie dies bei den kristallinen Zellen der Fall ist. Das Trägermaterial kann theoretisch beliebig zugeschnitten und mit Halbleitermaterial beschichtet werden.

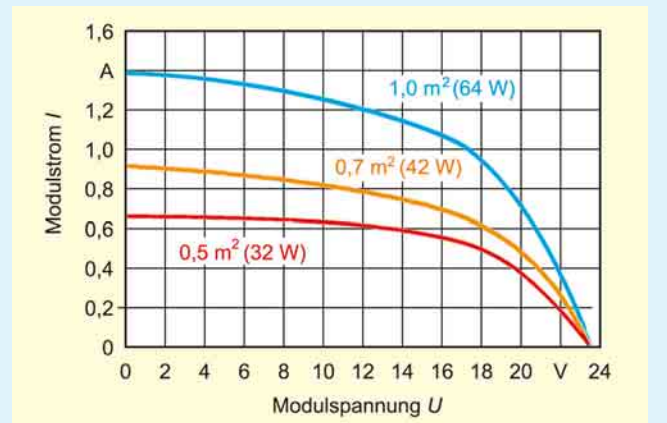
Dünnschicht-Solarzellen werden bereits während des Beschichtungsvorgangs verschaltet. Eine externe Verdrahtung wie bei kristallinen Ausführungen, die Zelle für Zelle miteinander verlötet werden müssen, entfällt. Der elektrische Kontakt besteht auf der Rückseite in der Regel aus einer nicht durchsichtigen Metallschicht, auf der lichtzugewandten Vorderseite aus einer transparenten leitfähigen Metalloxidschicht, die so genannte TCO-Schicht (TCO = Transparent Conductive Oxide). Übliche TCO-Materialien sind Zinkoxid (ZnO), Zinndioxid (SnO_2) oder Indium-Zinnoxid (ITO). Die TCO-Schichten sind ein entscheidender Kostenfaktor bei der Dünnschichtzellenproduktion.

2.3 Modulkennlinie

Die elektrischen Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit von Solarzellen lassen sich an der Strom-Spannungs-Kennlinie (I-U-Kennlinie, Bild 2) ablesen. Die Kennlinie einer Dünnschicht-Solarzelle unterscheidet sich zum Teil erheblich von der einer konventionellen kristallinen Silizium-Solarzelle. Sie verläuft in der

2 Typische Kennlinien von amorphen Dünnschicht-Modulen

Quelle: DGS

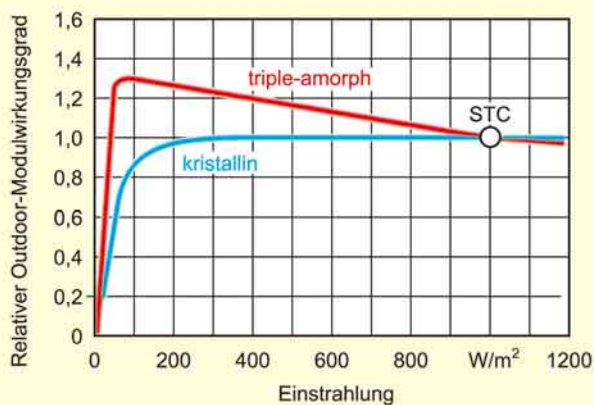


Regel flacher, was einen geringeren Füllfaktor zur Folge hat. Der nicht so deutlich ausgeprägte MPP-Punkt erfordert höhere Ansprüche an die MPP-Regelung [2].

2.4 Schwachlichtverhalten

Der Wirkungsgrad von Silizium-Solarzellen variiert je nach Bestrahlungsstärke. Er nimmt bei sinkenden Bestrahlungsstärken ab: bei 200 W/m^2 sind es noch rund 85 %, bei 100 W/m^2 etwa 75 % und bei 50 W/m^2 knapp

60 % des STC-Wirkungsgrads. Dünnschichtzellen jedoch können wegen ihrer spektralen Empfindlichkeit geringere Sonneneinstrahlung effektiver ausnutzen, sodass sie unter Freiluftbedingungen einen höheren Wirkungsgrad erreichen. Messungen an CdTe-Einfachzellen haben bei Einstrahlungen unter 500 W/m^2 Wirkungsgrade ergeben, die bis zu 14 % über dem STC-Wert lagen (Bild 3). Ein besonders gutes Schwachlichtverhalten zeigten die amorphen Siliziummodule in „Triple junction“-

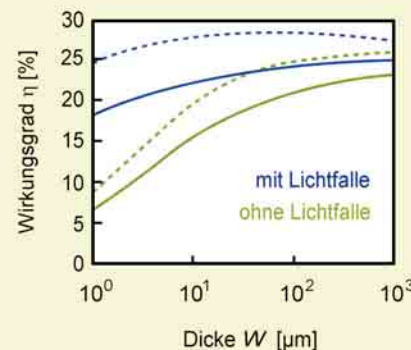


3 Modulwirkungsgrad unter Outdoor-Bedingungen: Vergleich Triple-amorph mit kristallinen Modulen
Quelle: DGS

4 Lichtfalle
Quelle: Institut für Solarenergieforschung (ISFH) ▼



Bedingt durch eine texturierte Oberfläche wird der Weg des Lichts verlängert



Die gestrichelte Linie zeigt den maximal erreichbaren Wert.

Technik, die deshalb einen höheren spezifischen Jahresertrag haben als Module mit Waferzellen gleicher Nennleistung. Der Mehrtrag wird vor allem durch die Optimierung der oberen Zelle auf das energiereiche blaue Licht des Sonnenspektrums erreicht. Dieser Anteil des Sonnenspektrums ist in der Lage, die Wolken zu durchdringen, so dass die Effizienz der Zellen bei einem höheren Diffusstrahlungsanteil, wie es bei Bewölkung und geringen Einstrahlungen oft der Fall ist, gesteigert wird.

2.5 Temperaturverhalten

Der Wirkungsgrad von Modulen nimmt mit steigender Temperatur ab. Bei den meisten Dünnschicht-Modulen (ausgenommen CIS-Module) ist die Abnahme mit steigender Temperatur nur halb so groß wie bei Modulen mit Waferzellen. Das bedeutet: Je höher die Modultemperatur, desto größer der Vorteil für die Dünnschicht-Solarzelle. Der relativiert sich allerdings dann, wenn die Module gut gekühlt werden wie beispielsweise bei Freiflächenanlagen. Dort fällt der Vorteil deutlich geringer aus als bei gebäudeintegrierten Anlagen.

3 Dünnschicht-Technologien

In Dünnschicht-Technologie gefertigte Solarmodule basieren auf Halbleitern, die vorzugsweise großflächig und meist kostengünstig auf

preiswerte Substrate (Trägermaterialien) wie beispielsweise Glas-, Metall- oder Plastikfolien aufgebracht werden. Mögliche Halbleiter sind kristallines, amorphes und mikromorphes Silizium, Cadmium-Tellurid (CdTe) oder Legierungen, deren Hauptbestandteile Kupfer und Indium (Akronym CI) sind, verbunden mit Sulfid oder Selen (CIS), Gallium und Selen (CIGS) oder Gallium, Sulfid und Selen (CIGSSe).

3.1. Dünnschicht-Solarzellen aus kristallinem Silizium

Ideal wäre es, könnte man die vorteilhaften Materialeigenschaften von kristallinem Silizium mit den vielen Herstellungsvorteilen, die die Dünnschicht-Technologie mit sich bringt, kombinieren. Dazu wäre es aber erforderlich, die durch die Waferfertigung begrenzte Materialdicke der Siliziumscheiben von bisher etwa 250 auf wenige μm zu reduzieren. Daraus folgt das nächste Problem: Langwelliges Licht wird in dünnem Silizium nur schlecht absorbiert, was gerade deshalb gravierend ist, weil ein großer Teil des von der Sonne emittierten Lichts in diesem langwelligen Spektralbereich liegt. Abhilfe schaffen hier so genannte Lichtfallen, die die eingefallenen Strahlen länger in der Zelle halten (Bild 4). Schwierigkeiten bereitet zudem die bei dünner werdenden Siliziumscheiben zunehmende Gefahr der Rekombination von Ladungsträgern, d. h. der gegenseitigen elektrischen Neutralisierung von negativen Elektronen und positiven Löchern.

Eine Rekombination lässt sich über eine spezielle Präparation der Oberfläche mindern, letztendlich aber nie ganz ausschließen.

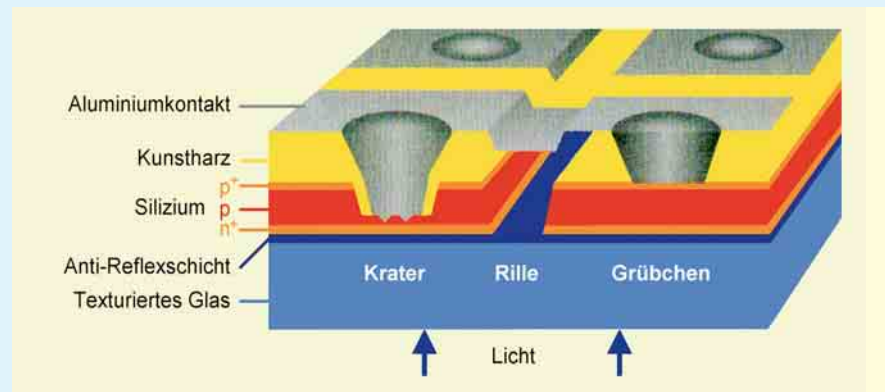
Die Forschungsaktivitäten zur Herstellung dünner kristalliner Siliziumscheiben mit dem Ziel, hohe Wirkungsgrade bei minimiertem Materialverbrauch zu erzielen, konzentrieren sich zur Zeit auf zwei Optionen, nämlich die Siliziumabscheidung bei hohen und einer solchen bei niedrigen Temperaturen. Beim Hochtemperaturverfahren mit Werten von 900 bis 1100 °C werden hochwertige Siliziumfilme auf einem preiswerten Substrat wie Graphit oder Keramik abgeschieden. Dabei entstehen großkörnige Strukturen, die denen polykristalliner Siliziumzellen ähnlich sind und Wirkungsgrade bis zu 16 % ermöglichen. Neuere Praktiken verwenden 20 bis 30 µm dicke Siliziumschichten, die bei Temperaturen von mehr als 1000 °C gewonnen, auf monokristallinen Wafern mit poröser Oberfläche abgeschieden und zuletzt mit einer Glas- oder Kunststoffscheibe abgedeckt werden. Dabei wirkt die löchrige Oberfläche des Wafers als Sollbruchstelle, sodass sich die monokristalline Silizium-Dünnschicht, die auf der Glasscheibe haftet, wie eine Abziehfolie lösen lässt. Von der industriellen Marktreife ist das Verfahren aber noch Jahre entfernt.

Das Verfahren der Siliziumabscheidung bei niedrigen Temperaturen ist bereits marktreif. Bei 200 bis 600 °C werden dünne Siliziumfilme mit sehr feinkörnigen mikrokristallinen Strukturen hergestellt und auf preiswerte Substrate wie Glas, Metall oder Kunststoff (die höhere Temperaturen nicht vertragen würden) aufgebracht. Diese mikrokristalline Zellen haben ähnliche optische Eigenschaften wie kristalline Waferzellen und erreichen stabile Wirkungsgrade von bis zu 8,5 %. Als Beispiel für den Aufbau von kristallinem

Tafel 1 Wirkungsgrade (Laborwerte) von Dünnschichtzellen und -modulen im Vergleich zu Zellen aus „dicken“ Wafern

Quelle: BINE Informationsdienst

Material	Dicke [µm]	Wirkungsgrad* Zelle [%]	Wirkungsgrad* Modul [%]
Kupfer-Indium-Diselenid $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$	8	19,5	13,6 – 16,6
Cadmiumtellurid (CdTe)	10	16,5	10,7
Amorphes Silizium	0,5 – 2	12 – 13	6,4 – 11,7
Kristallines Silizium	2 – 50	10,7 – 19,6	8,2 – 12,4
Zum Vergleich: Silizium-Wafer	250	24,7	22,7
*) Werte für Laboranlagen			



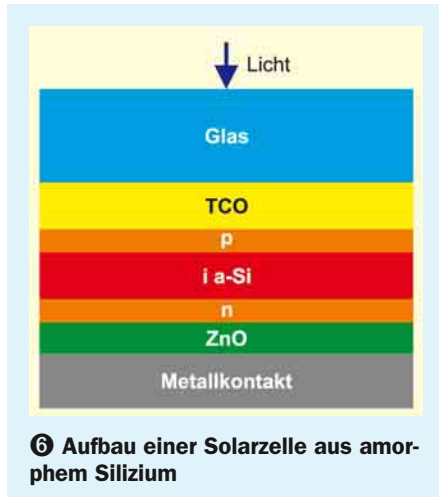
5 Schematischer Aufbau eines CSG-Moduls

Quelle: CSG Solar

Silizium auf Glassubstrate sei die „Crystalline Silicon on Glas“ (CSG)-Technologie genannt, die mit deutlich geringeren Mengen an Energie und Rohmaterial auskommt und gleichzeitig die Vorzüge von kristallinem Silizium nutzt. Dies gilt insbesondere für dessen Fähigkeit, auch über Jahrzehnte und unter extremen Bedingungen der direkten Sonneneinstrahlung standhalten zu können. Im CSG-Produktionsprozess kommt Silizium nicht in Form von Wafern zum Einsatz, sondern es wird direkt aus

Silangas gewonnen. Dabei wird eine dünne Schicht aus polykristallinem Silizium mit einer Dicke von 1,5 µm direkt auf eine strukturierte Glasscheibe aufgebracht und dann durch Erhitzung kristallisiert. Die dabei entstehende Schicht wird mit patentierten Laser- und Tintenstrahldruckverfahren weiterverarbeitet, um die notwendigen elektrischen Kontakte zu erzeugen (Bild 5).

Die ersten Serienmodule wurden mit einem Wirkungsgrad von knapp 9 % angeboten. Für



die nächsten Jahre wird eine Steigerung auf 12 bis 13 % prognostiziert. Die Schätzung erhöht sich für Tandemzellen auf 16 bis 17 % und für Tripelzellen auf 18 bis 19 % (Tafel 1).

3.2. Amorphe und mikromorphe Siliziumzellen

Zurzeit dominieren Module aus amorphem Silizium den Dünnschichtmarkt. Bisher wurden sie vorzugsweise im Freizeitbereich, beispielsweise auf Campingplätzen und auf Booten, sowie in der Architektur in Fassaden und halbtransparenten Verglasungen eingesetzt. Nachdem sich Vorbehalte bezüglich ihrer Stabilität und ihres Alterungsverhaltens durch

neue Langzeit-Testergebnisse als unbegründet erwiesen haben, erleben amorphe Module jetzt eine Renaissance und können sich zunehmend etablieren. Sie werden inzwischen mit einer Leistung von bis zu 100 W angeboten.

Amorphes Silizium bildet keine regelmäßige Kristallstruktur, sondern ein ungeordnetes Netzwerk (deshalb amorph: strukturlos), das etwa 10 % Wasserstoffatome enthält. Es wird in der Regel mit dem PECVD-Verfahren (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) durch Zerlegung von Silan (SiH_4) und Wasserstoff hergestellt. Der Prozess läuft bei niedrigen Temperaturen von etwa 200 °C ab, sodass kostengünstige Substratmaterialien wie Glas, aber auch Metall- und Kunststofffolien, eingesetzt werden können. Zur Dotierung werden Gase beigemischt, die entsprechende Dotierstoffe enthalten, beispielsweise B_2H_6 zur p-Dotierung und PH_3 zur n-Dotierung. Eine zwischen n-dotierte und p-dotierte Schicht eingefügte intrinsische (undotierte) Schicht aus amorphem Silizium soll eine Rekombination von Ladungsträgern verhindern oder zumindest minimieren. In der i-Schicht wird das Licht absorbiert; p- und n-Schicht erzeugen lediglich das elektrische Feld, das die freigesetzten Ladungsträger trennt (Bild 6).

Nachteile der amorphen Zellen sind der geringe Wirkungsgrad von kaum mehr als 7 % (im Labor 12–13 %), der zudem bei Lichteinwirkung abnimmt und sich erst nach 6 bis 12 Monaten auf seinen endgültigen Wert stabilisiert

(Staebler-Wronski-Effekt; die Module werden mit einer höheren Anfangsleistung als der Nennleistung ausgeliefert). Bessere Ergebnisse lassen sich durch die Stapelung einer amorphen und einer mikrokristallinen Siliziumzelle erzielen. Eine solche „mikromorphe“ Tandemzelle kann ein größeres Spektrum des Sonnenlichts nutzen, wenn jede Teilzelle für eine andere Wellenlänge optimiert wird. Der TCO-Frontkontakt besteht aus Zinnoxid (SnO_2), Indium-Zinnoxid (ITO) oder Zinkoxid (ZnO). Zusammen mit dem reflektierenden Rückkontakt streuen sie das Licht in der Solarzelle fast vollständig und ermöglichen so Wirkungsgrade von bis zu 9 %.

Literatur

- [1] DGS, Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Landesverband Berlin Brandenburg e. V. (Hrsg.): Photovoltaische Anlagen. Berlin 2005.
- [2] Photovoltaik – ein Fall für das Elektrohandwerk. Grundlagen – Zellentypen – Modultechnik. Elektropraktiker, Berlin 60 (2006) 9, S. 736–740.

Fortsetzung **ELEKTRO PRAKTIKER**

Kupfer-Indium-Diselenid-Solarzellen (CIS)
Cadmium-Tellurid-Solarzellen (CdTe)
Farbstoff-Solarzellen
Flexible „Organische Solarzellen“
Ausblick

GLOSSAR

Begriffe aus der Photovoltaik

Absorption

Aufnahme von Energie aus dem Halbleitermaterial

Degradation

bezeichnet die Alterung einer Solarzelle und die Abnahme des Wirkungsgrades über einen gewissen Zeitraum

Dotierung

Gezielte Zugabe von Fremdatomen in kleinen Mengen; erhöht die elektrische Leitfähigkeit eines Halbleiters; wird zur Herstellung von pn-Übergängen in Solarzellen (und elektronischen Bauteilen) verwendet

Dünnschicht-Solarzellen

Bezeichnung für Solarzellen, die nicht mit Hilfe der Silizium-Wafer-Technologie hergestellt werden

Füllfaktor

bezeichnet das Verhältnis von MPP-Leistung zu einer fiktiven Leistung aus Kurzschlussstromstärke und Leerlaufspannung aus der I-U-Kennlinie und gilt als Qualitätsmaßstab einer Solarzelle; typische Werte liegen zwischen 70 und 85 %

i-Schicht

Undotierte (intrinsische) Schicht

Lichtfallen

bestehen aus äußeren Reflexionsschichten, die den Aufenthalt des eingestrahnten Lichts verlängern mit dem Ziel einer effektiveren Absorption

Modulkennlinie. (I-U-Kennlinie)

An ihr lassen sich die elektrischen Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit von Solarzellen ablesen

MPP (Maximum Power Point)

Von der Einstrahlung und der Temperatur abhängiger Punkt der Modulkennlinie, in dem der Solargenerator die max. Leistung erzeugt

Rekombination

Vorgang, bei dem zwei Ladungsträger entgegengesetzten Vorzeichens (Elektronen und Löcher) aufeinander treffen, sich neutralisieren und dann nicht mehr für den Ladungstransport zur Verfügung stehen

Silizium, amorphes

Es besitzt im Gegensatz zu mono- oder polykristallinem Silizium keine kristalline Struktur, ist also strukturlos

Silizium, mikromorphes

Kombination aus amorphem und mikrokristallinem Silizium

Silizium, monokristallines

Es wird in einem relativ aufwendigen Verfahren in runden Stangen aus der Siliziumschmelze gezogen; bringt bei Solarzellen einen Wirkungsgrad von über 18 %

Silizium, polykristallines (multikristallines)

Es ist etwas grober als monokristallines Silizium und weist deutlichere Kristallkorn Grenzen auf; Herstellung preiswerter; Wirkungsgrad in Solarzellen etwas geringer als bei Zellen aus monokristallinem Silizium

Sputterverfahren (Kathodenzerstäubung)

Ein physikalischer Vorgang, bei dem Atome durch Beschuss mit energiereichen Ionen aus einem Festkörper herausgelöst werden; der Festkörper besteht aus dem Material, das auf einem Substrat abgeschieden werden soll

STC (Standard Testing Condition)

basiert auf einer Sonneneinstrahlung von 1000 W/m², einer Zelltemperatur von 25 °C und einer spektralen Verteilung der Sonnenstrahlung von AM (AirMass) gleich 1,5.

Substrat

Trägermaterial; dient als Unterlage zum gezielten Aufwachsen weiterer Schichten

Wafer

Dünne Scheiben aus Halbleitermaterial, das in der Photovoltaik meist aus Silizium besteht.