

Mehrfachsolarzelle

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Mehrfachsolarzelle mit wenigstens zwei auf Silizium und wenigstens einem anderen Material als Silizium basierenden Teilzellen, wobei eine erste Teilzelle zur Ausnutzung von Photonen in einem kurzwelligeren Spektralbereich als einem langwelligeren Spektralbereich einer zweiten Teilzelle ausgebildet ist, indem die zweite Teilzelle auf Silizium basiert und die erste Teilzelle auf einem Material mit einer größeren Bandlücke als in Silizium, wobei die erste Teilzelle und die zweite Teilzelle als eine monolithische, aus einem Schichtstapel bestehende Einheit ausgebildet sind, und wobei die erste Teilzelle und die zweite Teilzelle elektrisch miteinander mittels einer Tunnelodiode in Reihe geschaltet sind, sodass die Tandemsolarzelle mit zwei Anschlüssen ausgestattet ist, wobei die Tunnelodiode eine Tunnelioden-n-Schicht und eine Tunnelioden-p-Schicht aufweist.

Die globale Solarzellenindustrie hat in den beiden zurückliegenden Jahrzehnten einerseits kontinuierlich die Leistungsfähigkeit von Solarzellen gesteigert und andererseits kontinuierlich die Herstellungskosten von Solarzellen und der damit gewinnbaren Elektroenergie gesenkt. In den vergangenen Jahren haben multi- und monokristalline Siliziumsolarzellen den Markt von Solarzellen und Solarmodulen dominiert, wobei die kristallinen Siliziumsolarzellen regelmäßig Einfach-Solarzellen mit nur einem pn-Übergang sind. Die Wirkungsgrade von großvolumig hergestellten Solarzellen konnten und können durch gegenüber der jeweiligen Vorgängertechnologie verbesserte PERC-, passivierte Kontakt- bzw. PACO- und HJT-Technologien gesteigert werden. Jedoch sind die Herstellungstechnologien von Silizium-Einfachsolarzellen schon derzeit soweit perfektioniert, dass Potentiale für zukünftige weitere Verbesserungen bereits weitgehend ausgeschöpft sind. Die Wirkungsgrade der Silizium-Einfachsolarzellen erreichen allmählich bestehende physikalische Grenzen.

Tandemsolarzellen oder andere Mehrfachsolarzellen, in denen zwei oder mehr als zwei Teilzellen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit gemeinsam die Mehrfachsolarzelle ausbilden, können theoretisch und praktisch höhere Wirkungsgrade erreichen als Einfach-Solarzellen. Kommerziell verfügbare Mehrfachsolarzellen aus III-V-Halbleitern erreichen Rekordwirkungsgrade. Solche Solarzellen werden erfolgreich für extraterrestrische Anwendungen eingesetzt. Für terrestrische Anwendungen sind III-V-Solarzellen wegen zu hoher Herstellungskosten und letztlich zu hoher Stromgestehungskosten jedoch nicht mit kristallinen Siliziumsolarzellen konkurrenzfähig. Im ersten Jahrzehnt des 21. Jahrhunderts wurden Silizium-Dünnschicht-Solarzellen und -Solarmodule hergestellt, die aus verschiedenen amorphen und mikrokristallinen Teilzellen bestanden, wie sie

beispielsweise in EP 2 599 127 B1 beschrieben sind. Trotz geringer Herstellungskosten wurden diese Dünnschicht-Herstellungstechnologien jedoch von auf kristallinen Solarwafern basierenden Herstellungstechnologien verdrängt, weil die erreichten Modulwirkungsgrade zu klein waren.

Tandemsolarzellen aus zwei verschiedenen Materialien, die z.B. eine herkömmliche Siliziumsolarzelle und eine Perowskit-Dünnschichtsolarzelle mit einer Lichtabsorberschicht aus einem Perowskit-Material kombinieren, und Mehrfachsolarzellen, die noch wenigstens eine weitere andere Perowskitschicht aufweisen, werden derzeit in der Fachwelt als aussichtsreiche Kandidaten für zukünftige Mainstream-Solarzellen angesehen. Forschungslabore konnten in den letzten Jahren Verbesserungen von Wirkungsgraden und Stabilitäten von Silizium-Perowskit-Tandemsolarzellen erreichen. Für eine erfolgreiche industrielle Herstellung von Silizium-Perowskit-Tandemsolarzellen sind jedoch weitere technische Verbesserungen erforderlich. Führende, wie z.B. aus GB 2559800 B bekannte Labor-Demonstrator-Tandem-Solarzellen sind regelmäßig mit einer Vielzahl von Schichten aufwendig aufgebaut und in der Produktion entsprechend teuer. Für eine wirtschaftliche Bedeutung sind aber niedrige Herstellkosten erforderlich.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher darin, einfach aufgebaute Mehrfachsolarzellen vorzuschlagen.

Die Aufgabe wird von Mehrfachsolarzellen gelöst, in denen die Tunneldioden-n-Schicht und/oder die Tunneldioden-p-Schicht siliziumbasierte Schichten sind. In monolithischen Tandemsolarzellen und Mehrfachsolarzellen mit mehr als zwei Teilzellen sind die Teilzellen miteinander in gleicher Richtung in Reihe geschaltet. In Ersatzschaltbildern können einzelne Solarzellen und Teilzellen von Mehrfachsolarzellen als Dioden dargestellt werden, die in der Reihenschaltung der Mehrfachsolarzelle alle in Durchlassrichtung geschaltet sind. Entsprechend sind die p- und n-leitenden Schichten in den Teilzellen jeweils in der gleichen Reihenfolge angeordnet. Dies hat die Konsequenz, dass zur Verbindung von zwei Teilzellen eine n- und eine p-leitende Schicht in einer Abfolge miteinander zu verbinden sind, die umgekehrt zur Schicht-Abfolge in den einzelnen Teilzellen ist. Wenn die aufeinandertreffende n-leitende Schicht an der einen Teilzelle und eine p-leitende Schicht an der anderen Teilzelle eine (Verbindungs-)Diode ausbilden, dann wäre diese Diode in Sperrrichtung geschaltet. Da trotzdem ein Stromfluss benötigt wird, wird die leitfähige Verbindung von n- und p-leitender Schicht als eine Tunneldiode ausgebildet, die trotz der vorhandenen Schichtreihenfolge den erforderlichen Stromfluss ermöglicht. Teilweise wird die Schicht des einen Leitfähigkeitstyps (n- oder p-) die an die Schicht des anderen Leitfähigkeitstyps (p- oder n-) der Teilzelle grenzt, auch als Rekombinationsschicht bezeichnet, weil hier die aus der n-leitenden Schicht

der einen Teilzelle fließenden Elektronen und die aus der p-leitenden Schicht der anderen Teilzelle fließenden Löcher miteinander rekombinieren. Aus Si-Dünnschichtsolarzellen sind verschiedene, einfach herstellbare und entsprechend kostengünstige siliziumbasierte Rekombinationsschichten bekannt. Ähnliche Rekombinationsschichten können erfindungsgemäß in Tandem- und Mehrfach-Solarzellen eingesetzt werden, die aus wenigstens zwei verschiedenen Materialien bestehen, beispielsweise in Silizium-Perowskit-Tandemzellen. Die Eigenschaften der Rekombinationsschichten können für eine optimale Funktion optimiert werden. Der Tunnelübergang kann an der Grenzfläche von einer Teilzelle und einer Rekombinationsschicht oder zwischen zwei Tunneliodenschichten ausgebildet werden, die zusätzlich zu den zu den Teilzellen gehörenden Schichten in der Mehrfachsolarzelle angeordnet sind.

Wenn beispielsweise die äußerste Schicht einer Si-Teilzelle eine n-leitende Si-Schicht ist, dann kann der Tunnelübergang zwischen dieser n-leitenden Si-Schicht und einer p-leitenden siliziumbasierten Rekombinationsschicht ausgebildet werden. In diesem Beispiel dient die n-leitenden Si-Schicht als Tunnelioden-n-Schicht und die p-leitende siliziumbasierte Rekombinationsschicht als Tunnelioden-p-Schicht. In einem anderen Beispiel ist die anzuschließende Schicht der Si-Teilzelle p-leitend und die Rekombinationsschicht n-leitend. In einem weiteren Beispiel weist die Mehrfachsolarzelle zwischen den zu verbindenden Teilzellen zwei invers zueinander dotierte siliziumbasierte Schichten auf, von denen eine die Tunnelioden n-Schicht und die andere die Tunnelioden-p-Schicht ist. In weiteren Beispielen wird die Tunneliode zwischen einer n-leitenden siliziumbasierten Rekombinationsschicht und einer p-leitenden Schicht der ersten Teilzelle oder zwischen einer p-leitenden siliziumbasierten Rekombinationsschicht und einer n-leitenden Schicht der ersten Teilzelle ausgebildet.

Die siliziumbasierte Schicht kann eine mehr oder weniger dichte Siliziumschicht sein, sie kann neben Silizium weitere Bestandteile, insbesondere Wasserstoff und Dotanden, aufweisen. Die siliziumbasierte Schicht kann auch eine Siliziumlegierung sein, beispielsweise mit Sauerstoff (O), Kohlenstoff (C) oder Stickstoff (N). Das Attribut "siliziumbasiert" bedeutet, dass Silizium ein wesentlicher Bestandteil der Schicht ist bzw. dass der atomare Anteil von Silizium größer als 30% ist. In vielen Ausführungsbeispielen liegt der Siliziumanteil weit über 50%.

Wenigstens eine der Tunnelioden-n-Schicht und/oder die Tunnelioden-p-Schicht der erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle kann eine dotierte Legierung von Silizium und wenigstens einer weiteren Legierungskomponente M mit der Summenformel SiM_x -Schicht (8, 9) sein, wobei M für wenigstens eines der Elemente O, C oder N steht. Die Legierung kann auch eine ternäre oder eine

quarternäre Legierung sein, die zwei oder drei der angegebenen Elemente enthält. Die Verwendung solcher Siliziumlegierungsschichten wurde bereits im eingangs angegebenen Stand der Technik für Siliziumdünnschicht-Mehrfachsolarzellen vorgeschlagen. Weil die Solarzellentwicklung zwischenzeitlich andere Entwicklungsrichtungen eingeschlagen haben, sind frühere Ideen aus dem Bereich der Si-Dünnschichtsolar-technik in Vergessenheit geraten, sodass die Si-Dünnschichtsolar-technik nicht mehr als ein benachbartes Gebiet zu den heute entwickelten Si-Perowskit-Tandem- oder -Mehrfachsolarzellen angesehen werden kann. Zur Klasse der SiM_x -Legierungsschichten gehören ganz verschiedene Materialien, beispielsweise Schichten, bei denen leitfähige Si-Körner in eine weniger leitfähige SiO_xN_y oder in eine SiN_x Matrix eingebettet sind. Andere Materialien können zweiphasig aus einer Matrix und darin eingebetteten gut leitfähigen SiC-Körnern ausgebildet sein. Unter die Formel SiM_x fallen aber auch einphasige halbleitende Schichten, die Siliziumkarbidbindungen enthalten.

In einer Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Mehrfachsolazelle ist die Tunneln-dioden-n-Schicht eine hoch n-dotierte Si-Oberflächen-Höherdotierungsschicht der zweiten Teilzelle und die Tunneln-dioden-p-Schicht ist eine dotierte SiM_x -Schicht mit $x < 1$, wobei die SiM_x -Schicht inhomogen ist und aus einer Siliziumlegierungs-Matrix und darin eingelagerten Siliziumeinschlüssen besteht. Eine solche Mehrfachsolazelle ist besonders einfach aufgebaut, weil die Tunneln-diode nicht komplett aus zusätzlich abgeschiedenen Schichten besteht. Stattdessen dient die von der Herstellung der zweiten Teilzelle ohnehin vorhandene Oberflächenhöherdotierungsschicht aus Silizium zusätzlich auch als Tunneln-dioden-n-Schicht, sodass die Tunneln-diode bereits nach Abscheidung einer Schicht, nämlich der SiM_x -Schicht hergestellt ist. SiM_x Schichten können als Rekombinationsschichten mit einer hohen normalen Leitfähigkeit und einer geringeren lateralen Leitfähigkeit ausgebildet sein. Die SiM_x -Schicht kann aber auch gleiche Leitfähigkeiten in lateraler und normaler Richtung haben. Im Ermessen eines Fachmanns kann das SiM_x durch alternative Si-basierte Schichtmaterialien substituiert werden. In einer erfindungsgemäßen Mehrfachsolazelle können auch sowohl die Tunneln-dioden-n-Schicht als auch die Tunneln-dioden-p-Schicht eine dotierte SiM_x -Schicht sein. Die Tunneln-diode kann also auch aus zwei entgegengesetzt dotierten Siliziumlegierungsschichten SiM_x Schichten hergestellt sein. Zur Aktivierung der Dotanden und/oder zur Herstellung einer mikrokristallinen Schichtstruktur können die Schichten entsprechend nachbehandelt sein. Wenn die Si-Teilzelle eine temperaturempfindliche Heterojunction-Solarzelle ist, dann kann die Nachbehandlung abgeschiedener Schichten mit einer oberflächenwirksamen Methode durchgeführt werden, beispielsweise mit einer Blitzlampen-Nachbehandlung. Mit einer Sauerstoff- und/oder Stickstoffdotierung des Siliziums in den SiM_x -

Schichten können die optischen Verluste im Bereich der Kopplung der Teilzellen gegenüber anderen Kopplungsschichten teilweise reduziert werden.

Die SiM_x-Schicht in der erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle kann eine Gradientenschicht sein, wobei die elektrische Leitfähigkeit der Gradientenschicht an der Grenzfläche des pn-Übergangs der Tunneliode größer als an der anderen Grenzfläche der SiM_x-Schicht ist und wobei die Brechzahl der Gradientenschicht in Richtung von der ersten Teilzelle zu der zweiten Teilzelle zunimmt. Der Legierstoffanteil, z.B. der Sauerstoffanteil in einer SiO_x-Schicht, kann also eine Funktion der Schichtdicke sein. Mit einer Gradientenschicht können anders als bei über die Schichtdicke homogenen Schichten über die Einstellung von Gradientenparametern verschiedene Ziele erreicht werden, beispielsweise kann einerseits die Ausbildung eines Tunnelübergangs an einer Grenzfläche realisiert werden, andererseits kann an der Grenze zur Perowskitteilzelle eine nur wenig größere Brechzahl als von der Nachbarschicht in der Perowskit-Teilzelle eingestellt werden, sodass durch die gute optische Anpassung Reflexionsverluste minimiert werden.

Wenigstens eine der Tunnelioden-n-Schicht und der Tunnelioden-p-Schicht der erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle kann eine dotierte amorphe Si-Schicht sein. Amorphe Schichten können mit guten strukturellen Eigenschaften (konforme, glatte Abscheidung) und hinreichend guten elektrischen Eigenschaften hergestellt werden. Optische Verluste können durch geringe Schichtdicken minimiert werden, wobei geringe Schichtdicken auch mit geringen Herstellungskosten verbunden sind. Eine amorphe Si-Schicht kann als Rekombinationsschicht im Zusammenwirken mit einer angrenzenden Schicht einer Teilzelle die Tunneliode ausbilden. Wenigstens eine der Tunnelioden-n-Schicht und der Tunnelioden-p-Schicht kann auch eine dotierte nano- oder mikrokristalline Si-Schicht sein. Die nano- oder mikrokristalline Morphologie kann entweder während der Schichtabscheidung durch geeignete Prozessparameter oder nach der Abscheidung durch eine geeignete Nachbehandlung hergestellt worden sein. Die Attribute nanokristallin und mikrokristallin beziehen sich auf Kristallitabmessungen im Nanometerbereich oder im Mikrometerbereich. Oftmals sind Kristallitabmessungen in verschiedenen Raumrichtungen ähnlich groß. Mitunter liegt eine größte Kristallitabmessung im Mikrometerbereich, während andere Kristallitabmessungen kleiner als 1000 nm sind, also im Nanometerbereich liegen. Das betrifft insbesondere die Schichtdicke und die sich daraus ergebende normale Abmessung.

Die zweite Teilzelle der erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle kann eine Siliziumheterojunctionsolarzelle sein, bei der der pn-Übergang zwischen einem kristallinen Siliziumwafer und wenigstens einer darauf abgeschiedenen Schicht eines anderen Materials

ausgebildet ist. Heterojunctionsolarzellen sind die leistungsfähigsten verfügbaren Si-Einfach-Solarzellen. Sie sind deshalb eine gute Voraussetzung für große Gesamtwirkungsgrade der darauf basierenden Mehrfachsolarzellen mit einer oder mehr als einer breitbandigeren Teilzelle, die z.B. auf einem Perowskit-Material basiert. Die Siliziumteilzelle kann einen bewährten Aufbau einschließlich intrinsischer Passivierungsschichten und Oberflächentexturen haben. An der Ausbildung der Siliziumheterojunctionsolarzelle kann neben dem kristallinen Siliziumwafer wenigstens eine amorphe Siliziumschicht beteiligt sein. Zur Herstellung von Siliziumheterojunctionsolarzellen kann ein n-kristalliner Solarwafer auf der einen Seite mit einer intrinsischen (i) aSi-Schicht und einer p-dotierten aSi Schicht zur Ausbildung des Emitters der Solarzelle beschichtet werden. Auf der anderen Seite werden eine intrinsische aSi Schicht und eine höher als das Substrat n-dotierte Oberflächen-Feld-Schicht abgeschieden, sodass über der gesamten Si-HJT-Zelle ein Potentialgradient anliegt, der die Leitung der durch den Photoeffekt getrennten Ladungsträger zu den Kontakten bzw. den Anschlüssen der Solarzelle bzw. der Solarteilzelle fördert. Die i- und die n-aSi Schicht können auch als eine Gradientenschicht miteinander kombiniert vorliegen. Es gibt viele verschiedene Typen von Si-Heterojunction-Solarzellen. Das Substrat kann n- oder p-dotiert sein, der Emitter kann auf der zur Sonne hin vorgesehenen Seite oder der anderen Seite (Rückseite) angeordnet sein. Die dotierten Halbleiterschichten können amorph, nano- oder mikrokristallin sein. Bei dem halbleitenden Material kann es sich um Si oder um eine Legierung, z.B. SiC_x oder SiO_x handeln. Alle diese verschiedenen Solarzelltypen können auch die Si-Teilzelle einer erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle sein.

An der Ausbildung der Siliziumheterojunctionsolarzelle kann neben dem kristallinen Siliziumwafer auch wenigstens eine nano- oder mikrokristalline Siliziumschicht beteiligt sein. Nano- und mikrokristalline Schichten können gegenüber amorphen Schichten mit Vorteilen, beispielsweise höheren Leitfähigkeiten behaftet sein. Diese Vorteile können gezielt bei der Festlegung einer optimalen Schichtfolge in der Siliziumheterojunctionsolarzelle ausgenutzt werden.

In einer Ausgestaltung weist die zweite Teilzelle der erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle, nämlich eine Si-Heterojunctionsolarzelle, ein n-dotiertes Substrat, an ihrer der ersten Teilzelle abgewandten Seite eine intrinsische amorphe Siliziumschicht und eine p-dotierte amorphe Siliziumschicht und an ihrer der ersten Teilzelle zugewandten Seite eine n-dotierte Gradientenschicht mit geringerer Dotierung an der Grenzfläche zum Siliziumwafer auf, wobei die Mehrfachsolarzelle darauf in der angegebenen Reihenfolge eine n-SiM_x und eine p-SiM_x-Schicht und darauf entweder eine p-leitende Übergangsmetalloxidschicht oder direkt eine Lochleiterschicht der ersten Teilzelle aufweist. Diese Solarzelle hat einen sehr einfachen Aufbau und ist aus gut verfügbaren kostengünstigen Materialien hergestellt. In einem einfachen Beispiel sind zwischen den

beiden Teilsolarzellen lediglich zwei die Tunnel diode ausbildende SiO_x -Schichten angeordnet. In anderen Ausgestaltungen ist zusätzlich noch eine Übergangsmetalloxidschicht zwischen der p-SiMx-Schicht und der Lochleitungsschicht der ersten Teilsolarzelle angeordnet. Übergangsmetalloxidschichten sind als Grenzsichten zu Lochleiterschichten bewährt.

In einigen erfindungsgemäßen Mehrfach solarzellen weist die zweite Teilsolarzelle ein n-dotiertes Substrat, an ihrer der ersten Teilsolarzelle abgewandten Seite eine intrinsische amorphe Siliziumschicht und eine p-dotierte amorphe Siliziumschicht und an ihrer der ersten Teilsolarzelle zugewandten Seite wenigstens eine n-Si-Schicht auf, wobei die Mehrfach solarzelle auf der n-Si-Schicht eine amorphe p-Si-Schicht und darauf entweder eine p-leitende Übergangsmetalloxidschicht oder direkt eine Lochleiterschicht der ersten Teilsolarzelle aufweist.

In anderen Ausgestaltungen erfindungsgemäßer Mehrfach solarzellen weist die zweite Teilsolarzelle ein n-dotiertes Substrat, an ihrer der ersten Teilsolarzelle abgewandten Seite eine intrinsische Siliziumschicht und eine p-dotierte Siliziumschicht und an ihrer der ersten Teilsolarzelle zugewandten Seite wenigstens eine nano- oder mikrokristalline n-Si-Schicht auf, wobei die Mehrfach solarzelle auf der nano- oder mikrokristallinen n-Si-Schicht eine nano- oder mikrokristalline p-Si-Schicht und darauf entweder eine p-leitende Übergangsmetalloxidschicht oder direkt eine Lochleiterschicht der ersten Teilsolarzelle aufweist. An der Grenzfläche zum Silizium können intrinsische (i) Si-Schichten vorhanden sein. Die i-Si-Schicht kann dabei auch eine Lage innerhalb der (n)-Si-Schicht sein, die in einem Abscheideteilschritt ohne Dotiergaseinlass hergestellt worden ist. Im Unterschied zu den im vorigen Absatz beschriebenen Ausgestaltungen liegt also wenigstens eine der genannten Si-Schichten statt mit amorpher hier mit nano- oder mikrokristalliner Struktur vor. Nano- und mikrokristalline Schichten haben den Vorteil, dass darin hohe elektrische Leitfähigkeiten einstellbar sind.

Die Erfindung umfasst auch aus erfindungsgemäßen Mehrfach solarzellen hergestellte Solarmodule.

Für ein Funktionieren erfindungsgemäßer Mehrfach solarzellen ist ein zielführendes, sorgfältig durchzuführendes Herstellungsverfahren erforderlich. Insofern umfasst die vorliegende Erfindung auch ein Herstellungsverfahren, worin in entsprechenden Verfahrensschritten eine siliziumbasierte Tunnel dioden-n-Schicht und/oder eine siliziumbasierte Tunnel dioden-p-Schicht abgeschieden wird.

Ein Fachmann auf dem Gebiet der Erfindung kann bei Hinzuziehung seines Fachwissens weitere Ausgestaltungen der Erfindung ableiten, die auch mit vom Schutzzumfang der Patentansprüche umfasst sind, ohne dass diese Ausgestaltungen hier explizit beschrieben sind.

Die vorliegende Erfindung soll im Folgenden anhand von in Figuren skizzierten Ausführungsbeispielen weiter erläutert werden, wobei

Fig. 1 ein erstes Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle 1 und

Fig. 2 ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle 1 zeigt.

Fig. 1 skizziert den Aufbau eines Ausführungsbeispiels eines Halbfabrikates einer erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle 1. In einer Grobbetrachtung besteht die Mehrfachsolarzelle aus einer ersten Teilzelle 2, einer zweiten Teilzelle 3 und einer die Teilzellen 2, 3 verbindenden Tunnelodiode 5. Die Mehrfachsolarzelle ist durch mehrere Beschichtungsprozesse eines kristallinen Siliziumsolarwafers 10 hergestellt. Wie es Fachleuten auf dem Gebiet der Erfindung bekannt ist, hängen die Eigenschaften abgeschiedener Schichten stark von den verwendeten Abscheideverfahren und den Rahmenbedingungen vor und nach der Abscheidung ab, insofern gibt es einen engen Zusammenhang zwischen der erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle 1 und dem erfindungsgemäßen Herstellungsverfahren. Die Mehrfachsolarzelle 1 ist im dargestellten Ausführungsbeispiel eine Tandemsolarzelle, deren in Richtung der Sonne vorgesehene Vorderseite oben dargestellt ist. Wenn Sonnenstrahlung mit ihrem bekannten Spektrum von vorn in die Mehrfachsolarzelle einstrahlt, dann wird hier von der ersten Teilzelle ein kurzwelliger, insbesondere sichtbarer, spektraler Anteil absorbiert und in einen Photostrom umgewandelt und ein längerwelliger, insbesondere infraroter, Spektralbereich wird zur zweiten Teilzelle durchgelassen und dort zu einem Photostrom umgewandelt. Die von den beiden oder allgemeiner von allen Teilzellen erzeugten Photoströme sind in kostengünstig nur mit zwei Anschlüssen ausgestatteten Mehrfachsolarzellen gleich groß ausgelegt, um die Leistung und den Wirkungsgrad der Mehrfachsolarzelle zu maximieren. Bei der zweiten Teilzelle 3 handelt es sich im vorgestellten Ausführungsbeispiel um eine Siliziumheterojunction-Solarzelle basierend auf einem n-dotierten Wafer. Für Hochleistungssolarzellen werden derzeit n-dotierte Ausgangswafer bevorzugt, prinzipiell können aber auch p-dotierte Solarwafer als Ausgangsmaterial für Mehrfachsolarzellen zum Einsatz kommen. Der Siliziumwafer ist hier beidseitig texturiert, weil mit texturierten Solarzellen die besten Wirkungsgrade erreicht werden. Im dargestellten Ausführungsbeispiel sind auf der Rückseite des Solarwafers 10 zunächst eine intrinsische (i) amorphe Siliziumschicht (aSi) 11 und dann eine p-dotierte aSi-Schicht 12 angeordnet, die den Emitter der Si-Heterojunction-Teilzelle 3 bildet. In anderen, nicht dargestellten Ausführungsbeispielen befindet sich der Emitter an der Vorderseite. Die a-Si Schichten 11, 12, 13 werden regelmäßig mit CVD-Verfahren unter Verwendung wasserstoffhaltiger Präkursoren hergestellt, wobei der Wasserstoff teilweise mit in die Schichten

eingebaut wird. Deshalb sind die aSi-Schichten genaugenommen hydrogenisierte aSi-Schichten (aSi:H). Dieses Detail ist Fachleuten hinlänglich bekannt, sodass der Hinweis darauf entbehrlich ist. Auf der Vorderseite ist im dargestellten Ausführungsbeispiel statt eines i-n-aSi-Schichtpaares eine n-leitende aSi Gradientenschicht 13 vorhanden, die an der Grenzfläche zum Siliziumwafer 10 schwächer dotiert ist als an der gegenüberliegenden Grenzfläche. Die zur Herstellung der n-leitenden aSi Gradientenschicht verwendete Anlage ist einfacher aufgebaut, weil nur eine Abscheidungskammer (statt zwei separaten für i und n) benötigt wird. Nach unten hin wird das dargestellte Halbfabrikat einer Mehrfachsolarzelle 1 von einer transparenten leitfähigen Schicht (TCO) 18 abgeschlossen, wobei das TCO 18 einerseits als ein erster Teil einer elektrischen Anschluss Elektrode dient und andererseits als Antireflexionsschicht. Der elektrische Anschluss in dem aus der Mehrfachsolarzelle 1 hergestellten Solarmodul umfasst noch weitere, hier nicht dargestellte Komponenten, nämlich hier siebgedruckte Kontaktfinger und damit verbundene drahtförmige Sammelleitungen. In anderen Ausführungsbeispielen kommen andere Elektroden, beispielsweise mit siebgedruckten Busleitungen oder großflächigen Metallflächen zum Einsatz. Diese und weitere Bestandteile von Solarmodulen sind aus dem Stand der Technik bekannt und hier der Übersichtlichkeit halber in der Skizze weggelassen.

Die erste Teilzelle 2 besteht im vorgestellten Ausführungsbeispiel aus der Perowskit-Absorberschicht 4 einer organischen Lochleitungsschicht 15 und einer Metallübergangsoxidschicht 14 an der Unterseite dieser ersten Teilzelle 2 und einer Elektronenleitungsschicht 16 und einer TCO-Schicht 17 an der Vorderseite der ersten Teilzelle 2. Weitere Elektrodenbestandteile sind ebenso wie auf der Rückseite der Mehrfachsolarzelle 1 der Übersichtlichkeit halber in Fig. 1 weggelassen.

Die elektrische und optische Verbindung der ersten Teilzelle 2 und der zweiten Teilzelle 3 ist in dem hier vorgestellten Ausführungsbeispiel mittels einer Tunnel diode 5 realisiert. Die n-leitende SiO_x Schicht 8 hat dabei die Funktion der Tunnel dioden-n-Schicht 6 und die p-leitende SiO_x -Schicht 9 die Funktion der Tunnel dioden-p-Schicht 7. Die SiO_x -Schichten 8, 9 sind dabei zur Ausbildung eines Tunnelübergangs zwischen den beiden SiO_x -Schichten 8, 9 ausgestaltet.

In Fig. 2 ist ein zweites Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Mehrfachsolarzelle 1' vorgestellt, die einen noch einfacheren Aufbau als die in Fig. 1 gezeigte Mehrfachsolarzelle 1 hat. Bis auf die im Folgenden dargelegten Unterschiede weist dieses zweite Ausführungsbeispiel auch Gemeinsamkeiten mit dem ersten Ausführungsbeispiel auf. Zur Vermeidung von Wiederholungen wird deshalb auf die Ausführungen zu Fig. 1 verwiesen. Zwischen der ersten Teilzelle 2 und der zweiten Teilzelle 3 ist in hier lediglich eine einzige Schicht angeordnet und zwar die p-dotierte aSi -

Schicht, die als Tunneldioden-p-Schicht 7 bzw. als Rekombinationsschicht dient. Die Funktion der Tunneldioden-n-Schicht wird hier nicht von einer separat abgeschiedenen Schicht, sondern von der n-leitenden aSi Gradientenschicht 13 der zweiten Teilzelle 3 als zusätzliche Funktion mit übernommen. Somit ergibt sich ein besonders einfacher Aufbau der Mehrfachsolarzelle 1'.

Weitere, nicht explizit vorgestellte Ausführungsbeispiele ergeben sich aus der vorliegenden Offenbarung und einschäßigem Fachwissen auf dem Gebiet der Erfindung.

Bezugszeichen

1, 1'	Mulfachsolarzelle
2	erste Teilzelle
3	zweite Teilzelle
4	Perowskit-Absorberschicht
5	Tunneldiode
6	Tunneldioden-n-Schicht
7	Tunneldioden-p-Schicht
8	n-leitende SiO _x - Schicht
9	p-leitende SiO _x - Schicht
10	kristalliner Siliziumwafer (n-leitend)
11	i- aSi
12	p- aSi
13	n- aSi Gradientenschicht
14	Übergangsmetalloxidschicht
15	Lochleitungsschicht
16	Elektronenleitungsschicht
17	vordere TCO Antireflexions- und Kontaktschicht
18	hintere TCO Antireflexions- und Kontaktschicht

Patentansprüche

1. Mehrfachsolarzelle (1) mit wenigstens zwei auf Silizium und einem anderen Material als Silizium basierenden Teilzellen (2, 3), wobei eine erste Teilzelle (2) zur Ausnutzung von Photonen in einem kurzwelligeren Spektralbereich als einem langwelligeren Spektralbereich einer zweiten Teilzelle (3) ausgebildet ist, indem die zweite Teilzelle (3) auf Silizium basiert und die erste Teilzelle (2) auf einem Material mit einer größeren Bandlücke als in Silizium, wobei die erste Teilzelle (2) und die zweite Teilzelle (3) als eine monolithische, aus einem Schichtstapel bestehende Einheit ausgebildet sind, und wobei die erste Teilzelle (2) und die zweite Teilzelle (3) elektrisch miteinander mittels einer Tunnelodiode (5) in Reihe geschaltet sind, sodass die Tandemsolarzelle (1) mit zwei Anschlüssen ausgestattet ist, wobei die Tunnelodiode eine Tunneldioden-n-Schicht (6) und eine Tunneldioden-p-Schicht (7) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die Tunneldioden-n-Schicht (6) und/oder die Tunneldioden-p-Schicht (7) eine siliziumbasierte Schicht ist.
2. Mehrfachsolarzelle (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine der Tunneldioden-n-Schicht (6) und/oder der Tunneldioden-p-Schicht (7) eine dotierte Legierung von Silizium und wenigstens einer weiteren Legierungskomponente M mit der Summenformel SiM_x ist, wobei M für wenigstens eines der Elemente O, C oder N steht.
3. Mehrfachsolarzelle (1) nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Tunneldioden-n-Schicht eine hoch n-dotierte Si-Oberflächen-Höherdotierungsschicht der zweiten Teilzelle und die Tunneldioden-p-Schicht eine dotierte SiM_x -Schicht (9) mit $x < 1$ ist, wobei die SiM_x -Schicht inhomogen ist und aus einer Siliziumlegierungs-Matrix und darin eingelagerten Siliziumeinschlüssen besteht.
4. Mehrfachsolarzelle nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass sowohl die Tunneldioden-n-Schicht als auch die Tunneldioden-p-Schicht eine dotierte SiM_x -Schicht (8, 9) ist.
5. Mehrfachsolarzelle (1) nach wenigstens einem der Ansprüche 2-4, dadurch gekennzeichnet, dass die SiM_x -Schicht eine Gradientenschicht ist, wobei die elektrische Leitfähigkeit der Gradientenschicht an der Grenzfläche des pn-Übergangs der Tunnelodiode größer als an der anderen Grenzfläche der SiM_x -Schicht ist und wobei die Brechzahl der Gradientenschicht in Richtung von der ersten Teilzelle zu der zweiten Teilzelle zunimmt.
6. Mehrfachsolarzelle (1') nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine der Tunneldioden-n-Schicht (6) und der Tunneldioden-p-Schicht (7) eine dotierte amorphe Si-Schicht ist.

7. Mehrfachsolarzelle nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine der Tunneldioden-n-Schicht (6) und der Tunneldioden-p-Schicht (7) eine dotierte nano- oder mikrokristalline Si-Schicht ist.
8. Mehrfachsolarzelle (1) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Teilzelle (3) eine Siliziumheterojunctionsolarzelle ist, bei der der pn-Übergang zwischen einem kristallinen Siliziumwafer (10) und wenigstens einer darauf abgeschiedenen Schicht eines anderen Materials besteht.
9. Mehrfachsolarzelle (1) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass an der Ausbildung der Siliziumheterojunctionsolarzelle neben dem kristallinen Siliziumwafer (10) wenigstens eine amorphe Siliziumschicht (11, 12, 13) beteiligt ist.
10. Mehrfachsolarzelle (1) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass an der Ausbildung der Siliziumheterojunctionsolarzelle neben dem kristallinen Siliziumwafer (10) wenigstens eine nano- oder mikrokristalline Siliziumschicht (11, 12, 13) beteiligt ist.
11. Mehrfachsolarzelle (1) nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Teilzelle (3) ein n-dotiertes Substrat (10), an ihrer der ersten Teilzelle abgewandten Seite eine intrinsische Siliziumschicht (11) und eine p-dotierte Siliziumschicht (12) und an ihrer der ersten Teilzelle (2) zugewandten Seite eine n-dotierte Gradientenschicht (13) mit geringerer Dotierung an der Grenzfläche zum Siliziumwafer aufweist, wobei die Mehrfachsolarzelle darauf in der angegebenen Reihenfolge eine n-SiM_x (8) und eine p-SiM_x-Schicht (9) und darauf entweder eine p-leitende Übergangsmetalloxidschicht (14) oder direkt eine Lochleiterschicht (15) der ersten Teilzelle (2) aufweist.
12. Mehrfachsolarzelle (1') nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass die zweite Teilzelle (3) ein n-dotiertes Substrat, an ihrer der ersten Teilzelle (2) abgewandten Seite eine intrinsische amorphe Siliziumschicht und eine p-dotierte amorphe Siliziumschicht und an ihrer der ersten Teilzelle zugewandten Seite wenigstens eine n-Si-Schicht aufweist, wobei die Mehrfachsolarzelle auf der n-Si-Schicht eine amorphe p-Si-Schicht und darauf entweder eine p-leitende Übergangsmetalloxidschicht (14) oder direkt eine Lochleiterschicht (15) der ersten Teilzelle (2) aufweist.
13. Mehrfachsolarzelle nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die zweiten Teilzelle (3) ein n-dotiertes Substrat, an ihrer der ersten Teilzelle (2) abgewandten Seite eine intrinsische Siliziumschicht und eine p-dotierte Siliziumschicht und an ihrer der ersten Teilzelle zugewandten

Seite wenigstens eine nano- oder mikrokristalline n-Si-Schicht aufweist, wobei die Mehrfachsolarzelle auf der nano- oder mikrokristallinen n-Si-Schicht eine nano- oder mikrokristalline p-Si-Schicht und darauf entweder eine p-leitende Übergangsmetalloxidschicht (14) oder direkt eine Lochleiterschicht (15) der ersten Teilzelle (2) aufweist.

14. Mehrfachsolarzelle (1, 1') nach wenigstens einem der Ansprüche 1-13, dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrfachsolarzelle (1, 1') einen beidseitig texturierten Siliziumwafer aufweist.

15. Verfahren zur Herstellung von Mehrfachsolarzellen (1, 1') nach wenigstens einem der Ansprüche 1-13, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Herstellungsverfahren eine siliziumbasierte Tunneldioden-n-Schicht (6) und/oder eine Tunneldioden-p-Schicht (7) abgeschieden wird.