

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
17. Oktober 2013 (17.10.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/152965 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H01L 27/142 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/056767

(22) Internationales Anmeldedatum:
28. März 2013 (28.03.2013)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2012 205 978.4
12. April 2012 (12.04.2012) DE

(71) Anmelder: **ROBERT BOSCH GMBH** [DE/DE];
Postfach 30 02 20, 70442 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder: **PROBST, Volker**; Krampnitzer Weg 26H,
14089 Berlin (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM,

DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ,
TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA,
ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ,
RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,
CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,
GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

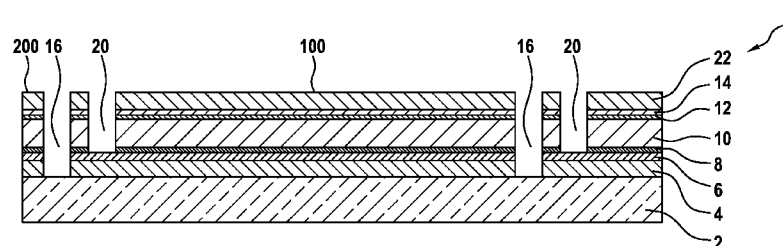
Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz
2 Buchstabe g)

(54) Title: PHOTOVOLTAIC THIN-FILM SOLAR MODULES AND METHOD FOR PRODUCING SUCH THIN-FILM SOLAR
MODULES

(54) Bezeichnung : PHOTOVOLTAISCHE DÜNNSCHICHTSOLARMODULE SOWIE VERFAHREN ZUR HERSTELLUNG
SOLCHER DÜNNSCHICHTSOLARMODULE

Fig. 3



(57) **Abstract:** The invention relates to photovoltaic thin-film solar modules, comprising in a first embodiment, particularly in the following order: at least one substrate layer; at least one rear electrode layer, particularly directly contacting the substrate layer; at least one conductive barrier layer, particularly directly contacting the rear electrode layer and/or the substrate layer; at least one contact layer, particularly an ohmic contact layer, particularly directly contacting the barrier layer; at least one semiconductor absorber layer, particularly a chalcopyrite or kesterite semiconductor absorber layer, particularly directly contacting the contact layer; optionally at least one first buffer layer, particularly directly contacting the semiconductor absorber layer and containing or substantially made of CdS or a CdS-free layer, particularly containing or made substantially of Zn(S, OH) or In₂S₃; and/or optionally at least one second buffer layer, particularly directly contacting the semiconductor absorber layer or the first buffer layer and containing or substantially made of intrinsic zinc oxide and/or high-resistance zinc oxide; and at least one transparent front electrode layer, particularly directly contacting the semiconductor absorber layer, the first buffer layer and/or the second buffer layer and particularly containing or substantially made of n-doped zinc oxide. Said thin-film solar modules further comprise: spaced-apart first structuring separation trenches filled with at least one insulating material, said trenches separating adjacent solar cells from one another down to the substrate layer; spaced-apart second structuring separation trenches filled or provided with at least one conductive material, said trenches extending to the contact layer or to the rear electrode layer or to the barrier layer, particularly to the barrier layer and each being adjacent to a filled first structuring separation trench; spaced-apart third structuring separation trenches, which extend to the contact layer or to the

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



rear electrode layer or to the barrier layer, particularly to the barrier layer, and are each adjacent to a second structuring trench on the other side of the first structuring trench to which the second structuring trench is adjacent; and at least one conductive bridge from second structuring trenches filled with a conductive material or furnished with such a material to the front electrode layer of the adjacent solar cell, across adjacent first structuring separation trenches filled with insulating material. The invention further relates to a method for producing such thin-film solar modules.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft photovoltaische Dünnschichtsolarmodule, in einer ersten Ausführungsform umfassend, insbesondere in dieser Reihenfolge, mindestens eine Substratschicht, mindestens eine, insbesondere an der Substratschicht unmittelbar anliegende, Rückelektrodenschicht, mindestens eine, insbesondere an der Rückelektrodenschicht und/oder der Substratschicht unmittelbar anliegende, leitfähige Barrierschicht, mindestens eine, insbesondere an der Barrierschicht unmittelbar anliegende, Kontaktschicht, insbesondere Ohm'sche Kontaktschicht, mindestens eine, insbesondere an der Kontaktschicht unmittelbar anliegende, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere Chalkopyrit- oder Kesterit-Halbleiterabsorberschicht, gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht unmittelbar anliegende, erste Pufferschicht, enthaltend oder im Wesentlichen aus CdS oder einer CdS-freien Schicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus $\text{Zn}(\text{S}, \text{OH})$ oder In_2S_3 , und/oder gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht oder der ersten Pufferschicht unmittelbar anliegende, zweite Pufferschicht, enthaltend und im Wesentlichen aus intrinsischem Zinkoxid und/oder hochohmigem Zinkoxid, und mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht, der ersten Pufferschicht und/oder der zweiten Pufferschicht unmittelbar anliegende, transparente Frontelektrodenschicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus n-dotiertem Zinkoxid, wobei beabstandete erste, mit mindestens einem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen bis zur Substratschicht voneinander trennen, beabstandete zweite, mit mindestens einem leitfähigen Material befüllte oder versehene Strukturierungstrenngräben, welche sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur Barrierschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem befüllten ersten Strukturierungstrenngraben vorliegen, beabstandete dritte Strukturierungstrenngräben, welche sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur Barrierschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem zweiten Strukturierungsgraben, jenseits des ersten Strukturierungsgrabens, zu welchem der zweite Strukturierungstrenngraben benachbart ist, vorliegen, und mindestens eine leitfähige Brücke von mit einem leitfähigen Material befüllten oder mit einem solchen Material versehenen zweiten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle sowie ein Verfahren zur Herstellung solcher Dünnschichtsolarmodule.

Photovoltaische Dünnschichtsolarmodule sowie Verfahren zur Herstellung solcher Dünnschichtsolarmodule

Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft photovoltaische Dünnschichtsolarmodule sowie ein Verfahren zur Herstellung solcher Dünnschichtsolarmodule.

Photovoltaische Solarmodule sind seit langem bekannt und auch im Handel erhältlich. Geeignete Solarmodule umfassen einerseits kristalline und amorphe Siliziumsolarmodule und andererseits sogenannte Dünnschichtsolarmodule. Derartige Dünnschichtsolarmodule basieren zum Beispiel auf der Verwendung einer sogenannten Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht, beispielsweise einem $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})$ -System, und stellen ein komplexes Mehrschichtsystem dar. Bei diesen Dünnschichtsolarmodulen liegt auf einem Glassubstrat üblicherweise eine Molybdänrückeletrodenschicht auf. Diese wird in einer Verfahrensvariante mit einer Kupfer und Indium sowie gegebenenfalls Gallium umfassenden Precursor-Metall dünnschicht versehen und anschließend in Gegenwart von Schwefelwasserstoff und/oder Selenwasserstoff bei erhöhten Temperaturen zu einem so genannten CIS- bzw. CIGS-System umgesetzt. In einer weiteren Verfahrensvariante können statt Selenwasserstoff und Schwefelwasserstoff auch elementarer Selendampf und Schwefeldampf eingesetzt werden. Die Herstellung solcher Dünnschichtsolarmodule ist folglich ein vielstufiger Prozess, bei dem aufgrund zahlreicher Wechselwirkungen jede Verfahrensstufe sorgsam auf nachfolgende Verfahrensstufen abgestimmt werden muss. Auch ist besondere Obacht bei der Auswahl und Reinheit der bei jeder Schicht zu verwendenden Materialien erforderlich. Anlagentechnisch bedingt ist es vielfach nicht oder nur sehr schwer möglich, Dünnschichtsolarmodule großtechnisch zu fertigen, deren Modulformat eine Größe von 1,2 m x 0,5 m überschreitet. Auch kann bislang bei den in einzelnen Herstellstufen anzuwendenden Temperaturen und Reaktionsbedingungen eine Kontamination oder Interdiffusion von Komponenten, Dotierstoffen oder Verunreinigungen einzelner Schichten des Mehrschichtsystems nicht ausgeschlossen werden. Schon mit der Wahl und der Art der Herstellung der Rückeletrodenschicht kann Einfluss auf den Wirkungsgrad einer Dünnschichtsolarzelle genommen werden. Beispielsweise hat die Rückeletrodenschicht über eine hohe

Querleitfähigkeit zu verfügen, um eine verlustarme Serienschaltung sicherzustellen. Auch sollten aus dem Substrat und/oder der Halbleiterabsorberschicht migrierende Substanzen keinen Einfluss auf die Qualität und Funktion der Rückelektrodenschicht oder der Halbleiterabsorberschicht haben. Darüber hinaus muss das Material der Rückelektrodenschicht eine gute Anpassung an das thermische Ausdehnungsverhalten von Substrat und den darüber liegenden Schichten aufweisen, um Mikrorisse zu vermeiden. Schließlich sollte auch die Haftung auf der Substratoberfläche allen gängigen Nutzungsanforderungen genügen. Zwar ist es möglich, zu guten Wirkungsgraden über den Einsatz von besonders reinem Rückelektrodenmaterial zu gelangen, allerdings gehen hiermit regelmäßig unverhältnismäßig hohe Produktionskosten einher. Zudem führen die vorangehend genannten Migrations- bzw. insbesondere Diffusionsphänome unter den üblichen Produktionsbedingungen nicht selten zu einer signifikanten Verunreinigung des Rückelektrodenmaterials. Zum Beispiel kann ein Dotierstoff, der in die Halbleiterabsorberschicht eingebracht ist, durch vorangehend genannte Diffusion in die Rückelektrode diffundieren und dadurch in der Halbleiterabsorberschicht verarmen. Die Konsequenz sind deutlich niedrigere Wirkungsgrade des fertiggestellten Solarmoduls. Man ist selbst bei Beachtung aller Verfahrens- und Materialoptimierungen noch stets stark eingeschränkt bei dem letztendlichen Design der für den Vertrieb vorgesehenen Dünnschichtsolarmodule.

Zu einer Solarzelle mit morphologisch gut ausgebildeter Absorberschicht und guten Wirkungsgraden soll man gemäß der DE 44 42 824 C1 dadurch gelangen, dass man die Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht mit einem Element aus der Gruppe Natrium, Kalium und Lithium in einer Dosis von 10^{14} bis 10^{16} Atomen/cm² dotiert und gleichzeitig eine Diffusionssperrschicht zwischen dem Substrat und der Halbleiterabsorberschicht vorsieht. Alternativ wird vorgeschlagen, ein alkalifreies Substrat zu verwenden, sofern auf eine Diffusionssperrschicht verzichtet werden soll.

Blösch et al. (Thin Solid Films 2011) schlagen vor, bei Verwendung einer Polyimidsubstratfolie ein Schichtsystem aus Titan, Titannitrid und Molybdän zu verwenden, um gute Haftungseigenschaften und ein zufriedenstellendes thermisches Eigenschaftsprofil zu erhalten. Blösch et al. (IEEE, 2011, Vol. 1, Nr. 2, Seiten 194 bis 199) schlagen für die Verwendung flexibler Dünnschichtsolarzellen ferner den Einsatz einer Edelstahlsubstratfolie vor, auf welche zunächst zwecks Verbesserung der Haftung eine dünne Titanschicht aufgebracht wird. Zufriedenstellende Ergebnisse wurden mit solchen CIGS-Dünnschichtsolarzellen erzielt, welche mit einer Titan/Molybdän/Molybdän-

Dreifachlage ausgestattet waren. Verbesserte Dünnschichtsolarzellen werden auch mit der technischen Lehre der WO 2011/123869 A2 angestrebt. Die darin offenbarte Solarzelle umfasst ein Natriumglassubstrat, eine Molybdän-Rückelektrodenschicht, eine CIGS-Schicht, eine Pufferschicht, eine Schicht aus intrinsischem Zinkoxid und eine Schicht aus mit Aluminium dotiertem Zinkoxid. Ein erster Trenngraben erstreckt sich über die Molybdänschicht, die CIGS-Schicht und die Pulverschicht, ein zweiter Trenngraben beginnt oberhalb der Molybdänschicht. Ein isolierendes Material wird in bzw. auf dem ersten Trenngraben abgeschieden, und eine Frontelektrodenschicht ist schräg auf die Solarzelle, einschließlich des ersten Trenngrabens, abzuschneiden. Auf diese Weise sollen Dünnschichtsolarzellen mit verbesserter Lichtausbeute erhalten werden. Die US 2004/014419 A1 ist bestrebt, eine Dünnschichtsolarzelle zur Verfügung zu stellen, deren Molybdän-Rückelektrodenschicht über einen verbesserten Wirkungsgrad verfügt. Dieses soll dadurch erreicht werden, dass man ein Glassubstrat mit einer Rückelektrodenschicht aus Molybdän versieht, deren Dicke 500 nm nicht überschreiten soll.

Dass unterschiedlichste Metalle wie Wolfram, Molybdän, Chrom, Tantal, Niob, Vanadium, Titan und Mangan als geeignete Rückelektrodenmaterialien für Dünnschichtsolarzellen in Frage kommen, ist schon bei Orgassa et al. (Thin Solid Films, 2003, Vol. 431-432, Seiten 1987 bis 1993) zu finden.

Es wäre daher wünschenswert, auf ein Verfahren zur Herstellung von photovoltaischen Dünnschichtsolarmodulen zurückgreifen zu können, das nicht mit den Nachteilen des Stands der Technik behaftet ist und das insbesondere mit weniger Prozessschritten auskommt und gleichwohl nicht Restriktionen, beispielsweise hinsichtlich Modulformaten, ausgesetzt ist, wie sie aus den Verfahren des Stands der Technik bekannt sind. Ferner lag der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, Dünnschichtsolarmodule zugänglich zu machen, die über einen größeren Füllfaktor und einen höheren Wirkungsgrad verfügen und weniger empfindlich gegenüber den Bedingungen des Herstellverfahrens sind und gleichwohl eine große Designvielfalt zulässt, z.B. hinsichtlich Länge, Breite und Form.

Demgemäß wurde ein photovoltaisches Dünnschichtsolarmodul (auch erste Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls genannt) gefunden, umfassend, insbesondere in dieser Reihenfolge, mindestens eine Substratschicht, insbesondere eine Glasscheibe, mindestens eine, insbesondere an der Substratschicht unmittelbar anliegende,

Rückelektrodenschicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus Molybdän, mindestens eine, insbesondere an der Rückelektrodenschicht und/oder an der Substratschicht unmittelbar anliegende, leitfähige Barrierschicht, insbesondere bidirektionale Barrierschicht, mindestens eine, insbesondere an der Barrierschicht unmittelbar anliegende, Kontaktschicht, insbesondere Ohm'sche Kontaktschicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus Molybdän und/oder Molybdänselenid und/oder Molybdänsulfoselenid, mindestens eine, insbesondere an der Kontaktschicht unmittelbar anliegende, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere Chalkopyrit- oder Kesterit-Halbleiterabsorberschicht, gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht unmittelbar anliegende, erste Pufferschicht, enthaltend oder im Wesentlichen gebildet aus CdS oder einer CdS-freien Schicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus $\text{Zn}(\text{S},\text{OH})$ oder In_2S_3 , und/oder gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht oder der ersten Pufferschicht unmittelbar anliegende, zweite Pufferschicht, enthaltend und im Wesentlichen gebildet aus intrinsischem Zinkoxid und/oder hochohmigem Zinkoxid, und mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht, der ersten Pufferschicht und/oder der zweiten Pufferschicht unmittelbar anliegende, transparente Frontelektrodenschicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus n-dotiertem Zinkoxid, gekennzeichnet durch beabstandete erste, mit mindestens einem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen bis zur Substratschicht voneinander trennen, beabstandete zweite, mit mindestens einem leitfähigen Material befüllte oder versehene Strukturierungstrenngräben, welche sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur Barrierschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem befüllten ersten Strukturierungstrenngraben vorliegen, beabstandete dritte Strukturierungstrenngräben, welche sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur Barrierschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem zweiten Strukturierungsgraben, jenseits des ersten Strukturierungsgrabens, zu welchem der zweite Strukturierungstrenngraben benachbart ist, vorliegen, und mindestens eine leitfähige Brücke von mit dem leitfähigen Material befüllten oder mit

einem solchen Material versehenen zweiten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen elektrisch serienverschaltet werden.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird des weiteren gelöst durch eine photovoltaisches Dünnschichtsolarmodul (auch zweite Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls genannt), umfassend, insbesondere in dieser Reihenfolge,

- mindestens eine Substratschicht, insbesondere eine Glasscheibe,
- mindestens eine, insbesondere an der Substratschicht unmittelbar anliegende, Rückelektrodenschicht, insbesondere enthaltend oder aus Molybdän,
- mindestens eine, insbesondere an der Rückelektrodenschicht unmittelbar anliegende, leitfähige Barrierschicht, insbesondere bidirektionale Barrierschicht,
- mindestens eine, insbesondere an der Barrierschicht unmittelbar anliegende, Kontaktschicht, insbesondere Ohm'sche Kontaktschicht, insbesondere enthaltend oder aus Molybdän und/oder Molybdänselenid und/oder Molybdänsulfoselenid,
- mindestens eine, insbesondere an der Kontaktschicht unmittelbar anliegende, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere Chalkopyrit- oder Kesterit-Halbleiterabsorberschicht,
- gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht unmittelbar anliegende, erste Pufferschicht, enthaltend oder im Wesentlichen gebildet aus CdS oder einer CdS-freien Schicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus $\text{Zn}(\text{S},\text{OH})$ oder In_2S_3 , und/oder
- gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht oder der ersten Pufferschicht unmittelbar anliegende, zweite Pufferschicht, enthaltend und im Wesentlichen gebildet aus intrinsischem Zinkoxid und/oder hochohmigem Zinkoxid, und mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht, der ersten Pufferschicht und/oder der zweiten Pufferschicht unmittelbar anliegende, transparente Frontelektrodenschicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen gebildet aus n-dotiertem Zinkoxid, gekennzeichnet durch
- beabstandete erste, mit mindestens einem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen bis zur Substratschicht voneinander trennen,
- beabstandete vierte Strukturierungstrenngräben, die sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur

Barriereschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem befüllten ersten Strukturierungstrenngraben vorliegen und die einen ersten Volumenbereich, der sich von der Barriereschicht bis zur Frontelektrodenschicht entlang der zum ersten Strukturierungstrenngraben benachbarten Trenngrabenwand erstreckt und der mit mindestens einem leitfähigen Material ausgefüllt oder versehen ist, und einen hierzu benachbarten zweiten Volumenbereich, der sich von der Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barriereschicht, insbesondere bis zur Barriereschicht, bis zur Frontelektrodenschicht erstreckt, umfassen, und mindestens eine leitfähige Brücke von den mit einem leitfähigen Material ausgefüllten oder mit einem solchen Material versehenen ersten Volumenbereichen der zweiten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit einem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen elektrisch serienverschaltet werden.

Bei diesen ersten und zweiten Ausgestaltungen erfindungsgemäßer photovoltaischer Dünnschichtsolarmodule können in einer ersten Ausführungsform auf der Substratschicht zunächst eine erste leitfähige Barriereschicht, hierauf die Rückelektrodenschicht, hierauf die Kontaktschicht, hierauf die Halbleiterabsorberschicht, hierauf gegebenenfalls die erste oder zweite Pufferschicht, und hierauf die Frontelektrodenschicht vorliegen. Bei diesen ersten und zweiten Ausgestaltungen können ferner in einer zweiten Ausführungsform auf der Substratschicht zunächst eine erste leitfähige Barriereschicht, hierauf die Rückelektrodenschicht, hierauf die zweite leitfähige Barriereschicht, hierauf die Kontaktschicht, hierauf die Halbleiterabsorberschicht, hierauf gegebenenfalls die erste oder zweite Pufferschicht, und hierauf die Frontelektrodenschicht vorliegen. Des weiteren können bei der ersten und zweiten Ausgestaltung erfindungsgemäßer Dünnschichtsolarmodule in einer dritten Ausführungsform, welche bevorzugt ist, auf der Substratschicht zunächst die Rückelektrodenschicht, hierauf die leitfähige Barriereschicht, hierauf die Kontaktschicht hierauf die Halbleiterabsorberschicht, hierauf gegebenenfalls die erste oder zweite Pufferschicht, und hierauf die Frontelektrodenschicht vorliegen.

Dabei kann in einer Ausführungsform vorgesehen sein, dass die Halbleiterabsorberschicht eine quaternäre IB-IIIA-VIA-Chalkopyritschicht, insbesondere eine $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ -Schicht, eine penternäre IB-IIIA-VIA-Chalkopyritschicht, insbesondere eine $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{Se}_{1-x}, \text{S}_x)_2$ -Schicht, oder eine Kesterit-Schicht, insbesondere eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se}_x, \text{S}_{1-x})_4$ -Schicht, z.B. eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se})_4$ - oder eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S})_4$ -Schicht, darstellt oder umfasst, wobei x beliebige Werte von 0 bis 1 annimmt.

Das Substrat stellt vorzugsweise eine Platte oder Folie dar. Das Substrat kann z.B. Glassubstrat wie eine Glasscheibe, eine flexible oder nicht-flexible Kunststoffschicht, beispielsweise Kunststofffolien, oder eine Metallplatte, beispielsweise Edelstahlschichten bzw. -folien insbesondere, mit einer Breite größer 0,5 m, insbesondere größer 2,0 m, und einer Länge größer 1,2 m, insbesondere größer 3,0 m, darstellen. Beispielsweise ist es sogar möglich, Substratformate, insbesondere Substratglasformate, mit einer Breite von 3,2 m und einer Länge von 6 m zu verwenden. Hieraus lassen sich z.B. 16 Dünnschichtsolarmodule im Modulformat 1,6 m x 0,7 m erhalten.

In einer besonders geeigneten Ausgestaltung ist vorgesehen, dass Rückelektrodenschicht enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus V, Mn, Cr, Mo, Ti, Co, Zr, Ta, Nb und/oder W und/oder enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus einer Legierung enthaltend V, Mn, Cr, Mo, Ti, Co, Fe, Ni, Al, Zr, Ta, Nb und/oder W. Die Rückelektrode im Sinne der vorliegenden Erfindung kann auch als Bulk-Rückelektrode und das System aus Bulk-Rückelektrode bzw. Rückelektrode, Barrierschicht und Kontaktschicht als Mehrschicht-Rückelektrode bezeichnet werden.

Dabei kann auch vorgesehen sein, dass die Barrierschicht eine Barriere für aus der und/oder über die Rückelektrodenschicht migrierende, insbesondere diffundierende bzw. diffundierbare, Komponenten, insbesondere Dotierstoffe, und/oder für aus der und/oder über die Kontaktschicht migrierende, insbesondere diffundierende bzw. diffundierbare, Komponenten, insbesondere Dotierstoffe, insbesondere eine bidirektionale Barrierschicht, darstellt. In letzterem Fall verhindert die Barrierschicht die Abreicherung der Halbleiterschicht an einem der diese Schicht bildenden Dotierstoff, z. B. Natrium, wodurch ein unbeeinträchtigter Wirkungsgrad beibehalten werden kann.

Die Barrierschicht ist zweckmäßiger Weise eine Barriere für Alkaliionen, insbesondere Natriumionen, oder Verbindungen enthaltend Alkaliionen, Selen oder Selenverbindungen, Schwefel oder Schwefelverbindungen und/oder Metalle, insbesondere Cu, In, Ga, Fe, Ni, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Al und/oder W. Sie ist vorzugsweise eine bidirektionale Barrierschicht und verhindert eine Kontamination der Halbleiterabsorberschicht mit Komponenten aus der Substrat- und/oder der Rückelektrodenschicht wie auch eine Kontamination der Rückelektrodenschicht mit Komponenten der Halbleiterschicht wie Cu, In und Ga. In letzterem Fall verhindert die Barrierschicht die Abreicherung der Halbleiterschicht an einem der diese Schicht bildenden Metalle, wodurch ein unbeeinträchtigter Wirkungsgrad beibehalten werden kann.

Die Barrierschicht der erfindungsgemäßen Rückelektrode verfügt in einer besonders zweckmäßigen Ausgestaltung über Barriereigenschaften, insbesondere bidirektionale Barriereigenschaften, gegenüber Dotierstoffen, insbesondere gegenüber Dotierstoffen für die Halbleiterabsorberschicht und/oder aus der Halbleiterabsorberschicht, gegenüber Chalkogenen wie Selen und/oder Schwefel sowie Chalkogenverbindungen, gegenüber den metallischen Bestandteilen der Halbleiterabsorberschicht wie Cu, In, Ga, Sn und/oder Zn, gegenüber Verunreinigungen wie Eisen und/oder Nickel aus der Rückelektrodenschicht und/oder gegenüber Komponenten und/oder Verunreinigungen aus dem Substrat. Die bidirektionalen Barriereigenschaften gegenüber Dotierstoffen aus dem Substrat sollen zum einen eine Anreicherung an der Grenzfläche der Rückelektrode bzw. Kontaktschicht zur Halbleiterabsorberschicht mit Alkaliionen, z.B. ausdiffundierend aus einem Glassubstrat, verhindern. Solche Anreicherungen sind bekannt als Grund für Halbleiter-Schichtablösungen. Die leitfähige Barrierschicht soll damit Haftungsprobleme vermeiden helfen. Andererseits soll die Barriereigenschaft für Dotierstoffe, ausdiffundierbar bzw. ausdiffundierend aus dem Halbleiterabsorber, verhindern, dass Dotierstoff auf diese Weise an die Rückelektrode verlorengeht und damit der Halbleiterabsorber an Dotierstoff verarmt, was den Wirkungsgrad der Solarzelle oder des Solarmoduls deutlich reduzieren würde. Denn es ist beispielsweise bekannt, dass Molybdän-Rückelektroden signifikante Mengen an Natrium-Dotierstoff aufnehmen können. Die bidirektionale leitfähige Barrierschicht soll somit die Voraussetzungen für eine gezielte Dosierung von Dotierstoff in die Halbleiterabsorberschicht ermöglichen, um reproduzierbar hohe Wirkungsgrade der Solarzellen und -Modulen erreichen zu können.

Die Barriereigenschaft gegenüber Chalkogenen soll demgemäß verhindern, dass diese an die Rückelektrode gelangen und dort Metallchalkogenidverbindungen ausbilden. Bekanntlich tragen diese Chalkogenidverbindungen, z.B. MoSe, zu einer erheblichen Volumenvergrößerung der oberflächennahen Schicht der Rückelektrode bei, was wiederum Unebenheiten in der Schichtenstruktur und verschlechterte Haftung mit sich bringt. Verunreinigungen des Rückelektrodenmaterials wie Fe und Ni stellen sogenannte tiefe Störstellen für z.B. Chalkopyrit-Halbleiter (Halbleitergifte) dar und sind demzufolge über die Barrierschicht von der Halbleiterabsorberschicht fernzuhalten.

In einer zweckmäßigen Ausgestaltung weist die Barrierschicht üblicherweise eine durchschnittliche Dicke von mindestens 10 nm, insbesondere mindestens 30 nm und vorzugsweise von maximal 250 nm oder 150 nm, auf.

Bedingt durch den Umstand des Vorliegens einer Barrierschicht ist es z.B. möglich, den Reinheitsgrad des Rückelektrodenmaterials signifikant zu reduzieren. Beispielsweise kann die Rückelektrodenschicht verunreinigt sein mit mindestens einem Element ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Fe, Ni, Al, Cr, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, W und/oder Na und/oder mit Verbindungen der genannten Elemente, ohne dass der Wirkungsgrad der die erfindungsgemäße Rückelektrode aufweisenden Dünnschichtsolarzelle bzw. des -moduls nachhaltig beeinträchtigt wird.

Besonders bevorzugt sind Barrierschichten enthaltend oder im Wesentlichen aus mindestens einem Metallnitrid, insbesondere TiN, MoN, TaN, ZrN und/oder WN, mindestens einem Metallcarbid, mindestens einem Metallborid und/oder mindestens einem Metallsiliziumnitrid, insbesondere TiSiN, TaSiN und/oder WSiN. Hierbei wird besonders auf solche Barrierschichten zurückgegriffen, beispielsweise TiN, die eine das Licht reflektierende Oberfläche liefern. Auf diese Weise kann Licht, das die Halbleiterabsorberschicht passiert hat, zur Steigerung des Wirkungsgrads nochmals durch diese gelenkt werden.

Derartige Metallnitride sind bevorzugt als Barrierematerialien im Sinne der vorliegenden Erfindung, beispielsweise TiN, bei denen das Metall hinsichtlich Stickstoff stöchiometrisch oder überstöchiometrisch, also mit Stickstoff im Überschuss, abgeschieden wird. In einer weiteren Ausführungsform ist vorgesehen, dass man vor, während und/oder nach der Abscheidung der Barrierschicht, insbesondere einer Metallnitrid- oder Metallsiliziumnitridbarrierschicht Sauerstoff in dieser Verfahrensstufe, insbesondere in geringen Mengen, zudosiert. Hierdurch sollen die Barriereigenschaften erhöht werden, ohne gleichzeitig die Leitfähigkeit der Barriere signifikant zu erniedrigen. Die Zudosierung von Sauerstoff im Zusammenhang mit der Aufbringung der Barrierschicht soll dazu führen, dass die Korngrenzen der nicht selten polykristallinen Dünnschichtbarriere mit Sauerstoff bzw. Sauerstoffverbindungen blockiert werden.

Ein weiterer Vorteil des Einsatzes einer Barrierschicht als Bestandteil eines Mehrschicht-Rückelektrodensystems (aus Rückelektroden-, Barriere- und Kontaktschicht) manifestiert sich bei Verwendung in erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen auch darin, dass die Dicke der Halbleiterabsorberschicht, beispielsweise der Chalkopyrit- oder Kesterit-Schicht, gegenüber herkömmlichen Systemen merklich verringert werden kann. Denn durch die Barrierschicht, insbesondere wenn in Form von Metallnitriden, beispielsweise Titannitrid, oder enthaltend solche Metall- bzw. Titanitride vorliegend, wird das die

Halbleiterabsorberschicht passierende Sonnenlicht sehr effektiv reflektiert, so dass sich im Wege des Doppeldurchtritts durch die Halbleiterabsorberschicht eine sehr gute Quantenausbeute erzielen lässt. Durch die Anwesenheit der genannten Barrierschicht in der erfindungsgemäßen Rückelektrode bzw. in Dünnschichtsolarzellen bzw. -modulen, enthaltend diese Rückelektrode kann die durchschnittliche Dicke der Halbleiterabsorberschicht auf z. B. Werte im Bereich von 0,4 μm bis 1,5 μm , beispielsweise auf Werte im Bereich von 0,5 μm bis 1,2 μm , verringert werden.

Die Barrierschicht liegt vorzugsweise zwischen der Rückelektrodenschicht und der Kontaktschicht vor. Alternativ oder zusätzlich kann mindestens eine Barrierschicht, wie vorangehend beschrieben, auch zwischen der Substratschicht und der Rückelektrodenschicht angebracht sein. In einem solchen Fall liegt die Rückelektrodenschicht nicht unmittelbar an der Substratschicht an.

In einer weiteren Ausgestaltung ist vorgesehen, dass die Kontaktschicht enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus Mo, W, Ta, Nb, Zr und/oder Co, insbesondere Mo und/oder W, und/oder mindestens ein Metallchalkogenid enthält oder hieraus im Wesentlichen gebildet ist und/oder mindestens eine erste Lage, benachbart zur Barrierschicht, enthaltend oder im Wesentlichen aus Mo, W, Ta, Nb, Zr und/oder Co, insbesondere Mo und/oder W, und mindestens eine zweite Lage, nicht benachbart zur Barrierschicht, enthaltend oder im Wesentlichen aus mindestens einem Metallchalkogenid, umfasst. Die Kontaktschicht grenzt vorzugsweise auf der dem Substrat zugewandten Seite unmittelbar an die Barrierschicht und/oder an der der Frontelektrode zugewandten Seite unmittelbar an die Halbleiterabsorberschicht an. Geeigneter Weise enthält die Kontaktschicht mindestens ein Metallchalkogenid.

Hierbei wird das Metall des Metallchalkogenids der Kontaktschicht bzw. der zweiten Lage der Kontaktschicht vorzugsweise ausgewählt aus Molybdän, Wolfram, Tantal, Zirkonium, Cobalt und/oder Niob und das Chalkogen des Metallchalkogenids vorzugsweise ausgewählt aus Selen und/oder Schwefel, wobei das Metallchalkogenid insbesondere MSe_2 , MS_2 und/oder $\text{M}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ darstellt mit $\text{M} = \text{Mo, W, Ta, Zr, Co oder Nb}$, wobei x beliebige Werte von 0 bis 1 annimmt, z.B. MoSe_2 , WSe_2 , TaSe_2 , NbSe_2 , $\text{Mo}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, $\text{W}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, $\text{Ta}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$ und/oder $\text{Nb}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$.

Solche Ausführungsformen haben sich auch als zweckmäßig erwiesen, bei denen das Metall der ersten Lage und das Metall der zweiten Lage der Kontaktschicht übereinstimmen und/oder dass das Metall der ersten Lage und/oder das Metall der

zweiten Lage der Kontaktschicht mit dem Metall der Rückelektrodenschicht übereinstimmen und/oder dass das Metall der Kontaktschicht mit dem Metall der Rückelektrodenschicht übereinstimmen.

Ferner weist die Kontaktschicht üblicherweise eine durchschnittliche Dicke von mindestens 5 nm und vorzugsweise nicht mehr als 150 nm, besonders bevorzugt von nicht mehr als 50 nm, auf.

Erfindungsgemäße Dünnschichtsolarmodule mit nochmals gesteigertem Wirkungsgrad erhält man häufig auch dadurch, dass die Halbleiterabsorberschicht mindestens einen Dotierstoff, insbesondere mindestens ein Element ausgewählt aus der Gruppe Natrium, Kalium und Lithium und/oder mindestens eine Verbindung dieser Elemente, vorzugsweise mit Sauerstoff, Selen, Schwefel, Bor und/oder Halogenen, z.B. Jod, , oder Fluor, und/oder mindestens eine Alkalimetallbronze, insbesondere Natrium- und/oder Kaliumbronze, vorzugsweise mit einem Metall ausgewählt aus Molybdän, Wolfram, Tantal und/oder Niob, aufweist.

Der Dotierstoff, insbesondere Natriumionen, liegt dabei in der Kontaktschicht und/oder der Halbleiterabsorberschicht vorteilhafter Weise in einer Dosis im Bereich von 10^{13} bis 10^{17} Atomen/cm² insbesondere im Bereich von 10^{14} bis 10^{16} Atomen/cm², vor.

Die erste Pufferschicht kann sowohl trocken- wie auch nass-chemisch abgeschieden werden. Dabei kann die erste Pufferschicht enthalten oder im Wesentlichen gebildet sein aus CdS oder einer CdS-freien Schicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus Zn(S,OH) oder In₂S₃. Die zweite Pufferschicht enthält vorzugsweise oder ist im Wesentlichen gebildet aus intrinsisch leitendem Zinkoxid und/oder hochohmigem Zinkoxid.

Das für die Frontelektrode verwendete Material ist vorzugsweise transparent für elektromagnetische Strahlung, insbesondere für Strahlung mit einer Wellenlänge im Bereich des Absorptionswellenlängenbereichs des Halbleiters. Geeignete Frontelektrodenmaterialien für photovoltaische Dünnschichtsolarzellen sowie deren Applikation sind dem Fachmann bekannt. In einer Ausführungsform enthält die Frontelektrode oder ist im Wesentlichen gebildet aus n-dotiertem Zinkoxid.

Erfindungsgemäße Dünnschichtsolarmodule zeichnen sich in besonders geeigneten Ausgestaltungen auch dadurch aus, dass die durchschnittliche Dicke der

Rüchkelektrodenschicht im Bereich von 50 nm bis 500 nm, insbesondere im Bereich von 80 nm bis 250 nm, und/oder die der Barrierieschicht im Bereich von 10 nm bis 250 nm, insbesondere im Bereich von 20 nm bis 150 nm, und/oder die der Kontaktschicht im Bereich von 2 nm bis 200 nm, insbesondere im Bereich von 5 nm bis 100 nm, und/oder die der Halbleiterabsorberschicht im Bereich von 400 nm bis 2500 nm, insbesondere im Bereich von 500 nm bis 2000 nm und vorzugsweise im Bereich von 800 nm bis 1600 nm, und/oder die der ersten Pufferschicht im Bereich von 5 nm bis 100 nm, insbesondere im Bereich von 10 nm bis 70 nm, und/oder die der zweiten Pufferschicht im Bereich von 10 nm bis 150 nm, insbesondere im Bereich von 20 nm bis 100 nm, liegt. Dabei ist die Gesamtdicke der Mehrschicht-Rüchkelektrode, d.h. des Systems aus Rüchkelektrode bzw. Bulk-Rüchkelektrode, Barrierieschicht und Kontaktschicht, vorzugsweise so einzustellen, dass der spezifische Gesamtwiderstand dieser Mehrschicht-Rüchkelektrode 50 microOhm*cm, bevorzugt 10 microOhm*cm, nicht überschreitet. Unter diesen Vorgaben lassen sich Ohm'sche Verluste in einem serienverschalteten Modul nochmals besonders effizient reduzieren.

Hohe Wirkungsgrade stellen sich mit erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen auch mit solchen Ausführungsformen ein, bei denen die Rüchkelektrodenschicht Molybdän und/oder Wolfram, insbesondere Molybdän, enthält oder im Wesentlichen aus Molybdän und/oder Wolfram, insbesondere Molybdän, gebildet ist, die leitfähige Barrierieschicht TiN enthält oder im Wesentlichen aus TiN gebildet ist, und die Kontaktschicht MoSe₂ enthält oder im Wesentlichen aus MoSe₂ gebildet ist.

Die ersten, zweiten, dritten und/oder vierten Strukturierungstrenngräben weisen in zweckmäßigen Ausgestaltungen erfindungsgemäßer Dünnschichtsolarmodule mindestens abschnittsweise, insbesondere vollständig, eine durchschnittliche Breite von nicht mehr als 50 µm, insbesondere von nicht mehr als 30 µm und vorzugsweise von nicht mehr als 15 µm, auf.

Dabei kann bei erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen auch vorgesehen sein, dass, insbesondere benachbarte, erste und zweite und/oder, insbesondere benachbarte, erste und dritte und/oder, insbesondere benachbarte, zweite und dritte Strukturierungsgräben, oder, insbesondere benachbarte, erste, zweite und dritte Strukturierungsgräben oder, insbesondere benachbarte, erste und vierte Strukturierungstrenngräben mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel verlaufen.

Des Weiteren hat es sich in Ausgestaltungen der Erfindung als vorteilhaft erwiesen, dass benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte vierte Strukturierungstrenngräben mindestens abschnittsweise einen durchschnittlichen Abstand im Bereich von 3 mm bis 10 mm, insbesondere von 4 mm bis 8 mm, aufweisen.

Dabei kann auch vorgesehen sein, dass benachbarte erste und zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite und dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben mindestens abschnittsweise, insbesondere vollständig, einen durchschnittlichen Abstand im Bereich von 5 μm bis 100 μm , insbesondere im Bereich von 10 μm bis 50 μm , aufweisen.

Bedingt durch die sehr schmal ausgestaltbaren Strukturierungstrenngräben und/oder bedingt durch die geringen Abstände zwischen benachbarten Strukturierungstrenngräben gelingt es, die effektive Fläche einer Solarzelle, d.h. diejenige Fläche, die für die Umwandlung von Sonnenenergie zur Verfügung steht, zu optimieren bzw. möglichst groß zu gestalten.

Bei erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen sind die ersten Strukturierungstrenngräben regelmäßig über das Niveau der Halbleiterabsorberschicht, insbesondere über das Niveau der Pufferschicht, hinaus mit dem Isolatormaterial befüllt. Hierbei liegt der Brückenwiderstand über den mit Isolator befüllten ersten Strukturierungstrenngraben vorzugsweise oberhalb von 50 k Ω , insbesondere oberhalb von 100 k Ω .

Bei erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen liegen regelmäßig mindestens zwei, insbesondere eine Vielzahl an, monolithisch integriert serienschalteten Solarzellen.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird des Weiteren gelöst durch ein Verfahren zur Herstellung einer ersten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls, umfassend:

- a) Zurverfügungstellung einer, insbesondere flächigen, Substratschicht,
- b) Aufbringen mindestens einer Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Substratschicht,
- c) Aufbringen mindestens einer leitfähigen Barrierschicht, insbesondere auf der

Substratschicht oder auf der Rückelektrodenschicht oder auf der Substratschicht und auf der Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Rückelektrodenschicht, welche unmittelbar auf der Substratschicht angebracht worden ist,

d) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Ohm'schen, Kontaktschicht, insbesondere auf der Barrierschicht,

e) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Kesterit- oder Chalkopyrit-, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere auf der Kontaktschicht,

f) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer ersten Pufferschicht, insbesondere auf der Halbleiterabsorberschicht,

g) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer zweiten Pufferschicht, insbesondere auf der ersten Pufferschicht oder der Halbleiterabsorberschicht,

h) Aufbringen mindestens einer Frontelektrodenschicht, insbesondere auf der Halbleiterabsorberschicht oder der ersten oder zweiten Pufferschicht,

i) mindestens einen ersten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen der auf die Substratschicht aufgetragenen Schichten entlang voneinander beabstandeter Linien mittels Laserbehandlung (erste Laserbehandlung) unter Ausbildung erster Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen trennen,

j) mindestens einen zweiten Strukturierungsschritt, umfassend

j1) Entfernen derjenigen Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang voneinander beabstandeter Linien unter Ausbildung zweiter Strukturierungstrenngräben, welche zu ersten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen, oder

j2) chemische Phasenumwandlung und/oder thermischer Zersetzung derjenigen Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang voneinander beabstandeter Linien unter Ausbildung erster linienförmiger leitfähiger Bereiche, welche zu ersten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen,

k) mindestens einen dritten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen der Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der

Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang voneinander beabstandeter Linien unter Ausbildung dritter Strukturierungstrenngräben, welche zu zweiten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen,

- l) Füllen der ersten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem Isolatormaterial,
- m) Füllen der zweiten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem leitfähigen Material,
- n) Ausbilden mindestens einer leitfähigen Brücke mit einem leitfähigen Material von den mit leitfähigem Material befüllten zweiten Strukturierungstrenngräben oder den ersten linienförmigen leitfähigen Bereichen über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen elektrisch serienschaltet werden.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird außerdem gelöst durch ein Verfahren zur Herstellung einer zweiten Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls, umfassend:

- a) Zurverfügungstellung einer, insbesondere flächigen, Substratschicht,
- b) Aufbringen mindestens einer Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Substratschicht,
- c) Aufbringen mindestens einer leitfähigen Barrierschicht, insbesondere auf der Substratschicht oder auf der Rückelektrodenschicht oder auf der Substratschicht und auf der Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Rückelektrodenschicht, welche unmittelbar auf der Substratschicht aufgebracht worden ist,
- d) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Ohm'schen, Kontaktschicht, insbesondere auf der Barrierschicht,
- e) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Kesterit- oder Chalkopyrit-, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere auf der Kontaktschicht,
- f) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer ersten Pufferschicht, insbesondere auf der Halbleiterschicht,
- g) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer zweiten Pufferschicht, insbesondere auf der ersten Pufferschicht oder auf der Halbleiterabsorberschicht,
- h) Aufbringen mindestens einer Frontelektrodenschicht, insbesondere auf der Halbleiterabsorberschicht oder auf der ersten oder zweiten Pufferschicht,
- i) mindestens einen ersten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen der auf die Substratschicht aufgetragenen Schichten entlang voneinander beabstandeter Linien

mittels Laserbehandlung (erste Laserbehandlung) unter Ausbildung erster Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen trennen,

o) mindestens einen vierten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen derjenigen Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang voneinander beabstandeter Linien unter Ausbildung vierter Strukturierungstrenngräben, welche zu ersten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen,

p) Füllen der ersten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem Isolatormaterial,

q) Füllen eines ersten Volumenbereichs der vierten Strukturierungstrenngräben, der sich von der Barrierschicht bis zur Frontelektrodenschicht entlang der zum ersten Strukturierungstrenngraben benachbarten Trenngrabenwand erstreckt mit mindestens einem leitfähigen Material, unter Nichtbefüllung/Freilassung eines hierzu benachbarten zweiten Volumenbereichs, der sich von der Barrierschicht bis zur Frontelektrodenschicht entlang derjenigen Trenngrabenwand erstreckt, die nicht zum ersten Strukturierungstrenngraben benachbart ist,

r) Ausbilden mindestens einer leitfähigen Brücke mit einem leitfähigen Material von den mit leitfähigem Material befüllten ersten Volumenbereichen der vierten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen elektrisch serienschaltet werden.

Das Füllen der zweiten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem leitfähigen Material und das Ausbilden mindestens einer leitfähigen Brücke mit einem leitfähigen Material von den mit leitfähigem Material befüllten zweiten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen serienschaltet werden, kann bei der Herstellung der ersten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls auch in einem Verfahrensschritt bzw. einem Arbeitsgang vorgenommen werden, d.h. die Schritte m) und n) können auch zu einem Schritt s) zusammengefasst werden.

Des Weiteren ist es bei der Herstellung der ersten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls möglich, dass die Reihenfolge der Schritte i), j1), k), l) und m)

beliebig ist, solange l), unmittelbar oder mittelbar, nach i) kommt und m), unmittelbar oder mittelbar, nach j1) kommt oder dass die Reihenfolge der Schritte i), j2), k) und l) beliebig ist, solange l), unmittelbar oder mittelbar, nach i) kommt. Bevorzugt ist die Abfolge i), j1), l), k), m) und n) oder i), j1), l), k) und s) bzw. i), j2), l), k) und n).

Die chemische Phasenumwandlung in Schritt j2) erfolgt vorzugsweise durch thermische Zersetzung derjenigen Schichten, die sich von der Barrierschicht bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, insbesondere mittels Laserbehandlung. Hierdurch wird entlang von mit z.B. Laserlicht behandelten Linien die Leitfähigkeit der genannten Schichten gegenüber den benachbarten unbehandelten Schichten deutlich erhöht. Dieses erlaubt, diese linienhaft behandelten Schichten, ähnlich wie mit leitfähigem Material befüllte zweite Strukturierungstrenngräben, zur Kontaktierung in der elektrischen Serienschaltung benachbarter Solarzellen zu benutzen. Dem Fachmann sind für die Phasenumwandlung geeignete Laserlichtwellenlängen und -pulsdauern bekannt. Geeignete Pulsdauern liegen z.B. oberhalb 1 nano-Sekunde.

Das Füllen der ersten Volumenbereiche der zweiten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem leitfähigen Material und das Ausbilden mindestens einer leitfähigen Brücke mit einem leitfähigen Material von den mit leitfähigem Material befüllten ersten Volumenbereich der zweiten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen serienschaltet werden, kann bei der Herstellung der zweiten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls auch in einem Verfahrensschritt bzw. einem Arbeitsgang vorgenommen werden, d.h. die Schritte q) und r) können auch zu einem Schritt t) zusammengefasst werden.

Des Weiteren ist es bei der Herstellung der zweiten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls möglich, dass die Reihenfolge der Schritte i), o), p) und q) beliebig ist, solange p), unmittelbar oder mittelbar, nach i) kommt und q), unmittelbar oder mittelbar, nach o) kommt, Bevorzugt ist die Abfolge i), o), p), q) und r) oder i), o), p) und t).

Die Verfahrensschritte i) und j1), i) und j2), i) und k), j1) und k), j2) und k), i), j1) und k) und/oder i), j2) und k) können in einer Weiterentwicklung auch gleichzeitig vorgenommen werden. Ferner können die Schritte i) und o) auch gleichzeitig vorgenommen werden.

In einer besonders geeigneten Ausführungsform ist das Substrat zumindest bereichsweise für elektromagnetische Strahlung der ersten Laserbehandlung durchlässig. Zweckmäßiger Weise kann diese Laserbehandlung des ersten Strukturierungsschritts, insbesondere durch Laserablation, von der der beschichteten Seite des Substrats abgewandten Seite erfolgen.

In einer weiteren Ausführungsform der erfindungsgemäßen Verfahren ist vorgesehen, dass in dem zweiten und/oder dritten und/oder vierten, insbesondere dem zweiten, Strukturierungsschritt die zweiten, dritten bzw. vierten Strukturierungstrenngräben mittels Laserbehandlung (zweite, dritte bzw. vierte Laserbehandlung) erzeugt werden und/oder dass in dem zweiten und/oder dritten und/oder vierten, insbesondere dem dritten und/oder vierten, Strukturierungsschritt die zweiten, dritten bzw. vierten Strukturierungstrenngräben mechanisch, insbesondere mittels Nadelritzens, erzeugt werden.

Gemäß einer besonders zweckmäßigen Ausführungsform der erfindungsgemäßen Verfahren ist vorgesehen, dass die ersten, zweiten, dritten und/oder vierten Strukturierungstrenngräben und/oder die ersten linienförmigen leitfähigen Bereiche mindestens abschnittsweise, insbesondere vollständig, mit einer durchschnittlichen Breite von nicht mehr als 50 μm , insbesondere von nicht mehr als 30 μm und vorzugsweise von nicht mehr als 15 μm , erzeugt werden.

Eine Weiterentwicklung der erfindungsgemäßen Verfahren sieht auch vor, dass, insbesondere benachbarte, erste und zweite und/oder, insbesondere benachbarte, erste und dritte und/oder, insbesondere benachbarte, zweite und dritte Strukturierungsgräben, oder, insbesondere benachbarte, erste, zweite und dritte Strukturierungsgräben oder, insbesondere benachbarte, erste und vierte Strukturierungstrenngräben oder, insbesondere benachbarte, erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel geführt werden.

Ferner hat sich eine solche Verfahrensführung als vorteilhaft erwiesen, bei der benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte vierte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste linienförmige leitfähige Bereiche mindestens abschnittsweise in einem durchschnittlichen Abstand von im Bereich von 3 mm bis 10 mm, insbesondere von 4 mm bis 8 mm, erzeugt werden.

Mit den erfindungsgemäßen Verfahren ist es in einer weiteren Ausführungsform ferner möglich, dass benachbarte erste und zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite und dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche mindestens abschnittsweise, insbesondere vollständig, in einem durchschnittlichen Abstand im Bereich von 5 μm bis 100 μm , insbesondere im Bereich von 10 μm bis 50 μm , erzeugt werden.

Hierbei ist eine solche Ausführungsform besonders geeignet, bei der benachbarte erste, zweite und dritte oder benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben oder benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche einen geringeren durchschnittlichen Abstand zueinander aufweisen als nicht benachbarte erste, zweite und dritte bzw. nicht benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben oder nicht benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche.

Regelmäßig werden bei der ersten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens dritte Strukturierungstrenngräben, insbesondere sämtliche dritten Strukturierungstrenngräben, durch den jeweils benachbarten zweiten Strukturierungstrenngraben oder den ersten linienförmigen leitfähigen Bereich von dem jeweils benachbarten ersten Strukturierungstrenngraben separiert sind.

Bei der Herstellung der Strukturierungstrenngräben erfolgen die erste Laserbehandlung, die zweite Laserbehandlung und/oder die dritte Laserbehandlung vorzugsweise mit Laserlichtpulsen mit einer Pulsdauer im Bereich von 1 pico-Sekunde bis 1 nano-Sekunde. Im Verfahren für die erste und die zweite Laserbehandlung können zum Beispiel Laserlichtpulse mit einer Pulsdauer kleiner 10 pico-Sekunden zum Einsatz kommen. Der Linienvorschub kann z.B. Geschwindigkeiten von einigen m/sec betragen und ist massenproduktionstauglich.

Der erste, zweite und dritte Strukturierungsschritt der ersten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens oder der erste und vierte Strukturierungsschritt der zweiten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens führen regelmäßig oder tragen regelmäßig zu einer monolithisch integrierten Serienverschaltung der Solarzellen bei. Diese Strukturierungsschritte sind vorzugsweise als linienhafte Prozessierschritte ausgestaltet.

Als besonders zweckmäßig haben sich auch solche Verfahrensführungen erwiesen, bei denen die, insbesondere mindestens einen Dotierstoff enthaltende, Kontaktschicht enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus Molybdän, Tantal, Zirkonium, Cobalt, Niob und/oder Wolfram (erste Metalllage) und/oder mindestens einem Metallchalkogenid ausgewählt aus Metallselenid, Metallsulfid und/oder Metallsulfoselenid mit Metall = Mo, W, Ta, Zr, Co oder Niob, insbesondere ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus MoSe_2 , WSe_2 , MoS_2 , WS_2 , $\text{Mo}(\text{Se}_{1-x}, \text{S}_x)_2$ und/oder $\text{W}(\text{Se}_{1-x}, \text{S}_x)_2$, wobei x beliebige Werte von 0 bis 1 annimmt.

Die erfindungsgemäßen Verfahren sehen vorzugsweise vor, dass die Halbleiterabsorberschicht eine quaternäre IB-III A-VIA-Chalkopyritschicht, insbesondere eine $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ -Schicht, eine penternäre IB-III A-VIA-Chalkopyritschicht, insbesondere eine $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{Se}_{1-x}, \text{S}_x)_2$ -Schicht, oder eine Kesterit-Schicht, insbesondere eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se}_x, \text{S}_{1-x})_4$ -Schicht, z.B. eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se})_4$ - oder eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S})_4$ -Schicht, darstellt oder umfasst, wobei x Werte von 0 bis 1 annimmt.

Als besonders vorteilhaft hat sich außerdem eine solche Vorgehensweise erwiesen, bei der durch das Aufbringen der Kesterit- oder Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht auf der Kontaktschicht in der Kontaktschicht vorliegende Metalle oder diese Kontaktschicht bildende Metalle vollständig oder partiell zu Metallseleniden, Metallsulfiden und/oder Metallsulfoseleniden umgewandelt werden.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann dabei z.B. derart vorgenommen werden, dass die Kontaktschicht eine Schichtenabfolge umfasst aus mindestens einer Metallschicht und mindestens einer Metallchalkogenidschicht, wobei die Metallschicht an der Rückelektrodenschicht oder an der leitfähigen Barrierenschicht anliegt bzw. angrenzt und wobei die Metallchalkogenidschicht an der Halbleiterabsorberschicht anliegt bzw. angrenzt. Von Vorteil sind auch solche Vorgehensweisen, bei denen das Metall der Metallschicht und das Metall der Metallchalkogenidschicht übereinstimmen, insbesondere Molybdän und/oder Wolfram darstellen.

Auch kann das erfindungsgemäße Verfahren beispielsweise derart ausgestaltet werden, dass auf die Barriereschicht mindestens eine erste Metalllage aus z.B. Molybdän, Tantal, Zirkonium, Cobalt, Wolfram und/oder Niob aufgebracht wird und dass diese erste Metalllage bei der Herstellung der Halbleiterabsorberschicht, insbesondere der Kesterit- oder Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht, in Selen- und/oder Schwefel-haltiger Atmosphäre unter Ausbildung der Kontaktschicht teilweise zu einer Metallchalkogenidschicht umgesetzt wird. Eine weitere Ausgestaltung des

erfindungsgemäßen Verfahrens sieht ferner vor, dass auf die Barrierschicht mindestens eine erste Metalllage aus Molybdän, Tantal, Wolfram, Cobalt, Zirkonium und/oder Niob aufgebracht wird und dass diese erste Metalllage bei der Herstellung der Halbleiterabsorberschicht, insbesondere der Kesterit- oder Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht, in Selen- und/oder Schwefel-haltiger Atmosphäre unter Ausbildung der Kontaktschicht vollständig zu einer Metallchalkogenidschicht umgesetzt wird.

Bei den erfindungsgemäßen Verfahren umfasst der Schritt des Aufbringens der Halbleiterabsorberschicht, insbesondere der Kesterit- oder Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht, in einer zweckmäßigen Ausführungsform demgemäß die Abscheidung von, insbesondere sämtlichen, metallischen Komponenten der Halbleiterabsorberschicht, insbesondere von Kupfer, Indium und gegebenenfalls Gallium für die Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht und Kupfer, Zink und Zinn für die Kesterit-Halbleiterabsorberschicht, auf der Kontaktschicht unter Ausbildung einer zweiten Metalllage und das Behandeln dieser zweiten Metalllage mit Selen und/oder einer Selenverbindung sowie gegebenenfalls mit Schwefel und/oder einer Schwefelverbindung, vorzugsweise bei Temperaturen oberhalb von 300°C, insbesondere oberhalb von 350°C.

Bei der Herstellung der Halbleiterabsorberschicht liegen die Umsetzungstemperaturen häufig auch im Bereich von 500°C bis 600°C. Bei derartigen Temperaturen migrieren, insbesondere diffundieren, Dotierstoffe, wie insbesondere Natriumionen bzw. Natriumverbindungen, aus der dotierten Kontaktschicht in die Halbleiterabsorberschicht. Bedingt durch die Barrierschicht findet eine Migration bzw. Diffusion in die Rückelektrodenschicht nicht statt. Aufgrund der genannten relativ hohen Temperaturen bei der Prozessierung des Halbleiters ist es vorteilhaft, dass die ausgewählten Schichten der Mehrschichtrückelektrode, insbesondere die Rückelektrode und/oder die leitfähige Barrierschicht so zusammengesetzt sind, dass deren linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient an den des Halbleiterabsorbers und/oder des Substrates angepasst sind. Daher sollten insbesondere die Rückelektrode und/oder die Barrierschicht der erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodule vorzugsweise so zusammengesetzt sein, dass ein linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient von $14 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}$, bevorzugt von $9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{K}$ nicht überschritten wird.

Bei den erfindungsgemäßen Verfahren kann ferner vorgesehen sein, dass die Rückelektrodenschicht, die leitfähige Barrierschicht, die erste Metalllage, insbesondere

enthaltend Mo, die Kontaktschicht, die zweite Metalllage, insbesondere enthaltend Cu, In und Ga, die erste Pufferschicht, die zweite Pufferschicht und/oder die Frontelektrodenschicht erhalten werden mittels physikalischer Gasphasenabscheidung, insbesondere umfassend Physical Vapor Deposition (PVD)-Beschichtung, Aufdampfen mittels eines Elektronenstrahl-Verdampfers, Aufdampfen mittels eines Widerstandsverdampfers, Induktionsverdampfung, ARC-Verdampfung und/oder Kathodenzerstäubung (Sputter-Beschichtung), insbesondere DC- oder RF-Magnetron-Sputtern, jeweils vorzugsweise in einem Hochvakuum, oder mittels chemischer Gasphasenabscheidung, insbesondere umfassend Chemical Vapour Deposition (CVD), Niederdruck- (low pressure) CVD und/oder Atmosphären- (atmospheric pressure) CVD.

Hierbei ist von besonderem Vorteil, dass das Aufbringen der Rückelektrodenschicht, der leitfähigen Barrierschicht, der ersten Metalllage oder der Kontaktschicht und der zweiten Metalllage in einer einzigen Vakuum-Beschichtungsanlage, vorzugsweise im Durchlauf-Sputterverfahren, erfolgen können.

Außerdem ist bei den erfindungsgemäßen Verfahren von Vorteil, dass der erste und der zweite Strukturierungsschritt und der Schritt des Verfüllens des ersten Strukturierungsgrabens mit dem Isolatormaterial in einer einzigen Anlage erfolgen können. Die Strukturierungsschritte des erfindungsgemäßen Verfahrens sowie die Befüllschritte können, soweit sie nicht sachlogisch nacheinander erfolgen müssen, in Teilen oder auch vollständig gleichzeitig erfolgen bzw. vorgenommen werden. Beispielsweise kann hierfür auf Mehrschicht-Kopf-Anordnungen für Laser- und Ink-Jet- oder Aerosol-Jet-Vorrichtungen zurückgegriffen werden, mit denen parallel mehrere Gräben prozessiert und aufgefüllt werden können.

Es kann erfindungsgemäß bevorzugt sein, dass zum Aufbringen von leitfähigen oder weiteren Strukturen mittels erfindungsgemäßer Laser- und Ink-Jet- oder Aerosol-Jet-Vorrichtungen eine Tinte, vorzugsweise eine Hotmelt-Aerosol-Tinte, zerstäubt wird und dadurch ein leitfähiger Kontakt auf das Substrat aufgebracht wird, wobei die Laser- und Ink-Jet- oder Aerosol-Jet- Vorrichtungen mindestens teilweise beheizbar oder beheizt sind, vorzugsweise mit der Maßgabe, dass die eingesetzte Tinte eine Viskosität von $\eta \leq 1$ Pas bei einer Temperatur von mindestens 40°C aufweist. Dies ist beispielhaft in der DE 10 2007 058 972 A1 beschrieben, welche hiermit durch diesen Verweis eingebunden ist.

Auch kann es vorteilhaft sein, wenn eine Tinte für insbesondere die Ink-Jet und/oder die Aerosol-Jet-Vorrichtung(en) Metallpartikel umfasst, insbesondere Metallpartikel

ausgewählt aus einer Gruppe bestehend aus Silber, Zinn, Zink, Chrom, Cobalt, Wolfram, Titan und/oder deren Mischungen. Alternativ oder zusätzlich kann die Tinte die Metalloxide, beispielsweise Bleioxid, Bismuthoxid, Titanoxid, Aluminiumoxid, Magnesiumoxid und/oder deren Mischungen, enthalten.

Auch kann es vorteilhaft sein, wenn die Tinte thermoplastische Verbindungen ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus C_{16} bis C_{20} , bevorzugt C_{14} bis C_{16} linearen aliphatischen Alkoholen und/oder mehrwertigen Alkohole, wie Hexan-1,6-diol enthält.

Erfindungsgemäß kann auch bevorzugt sein, dass das in der Tinte enthaltene Lösungsmittel ausgewählt ist aus Glykolether, M-Methylpyrrolidon, 2-(2-Butoxyethoxy)ethanol und/oder deren Mischungen.

Auch kann bevorzugt sein, dass die Tinte als Additive Diespergiermittel und/oder Entschäumer enthält.

Die Strukturierungsgräben können dabei z.B. über die Länge eines Dünnschichtsolarmoduls in einem durchgehenden Arbeitsgang gefertigt werden. Beispielsweise können auf diese Art Strukturierungsgräben mit einer Länge von 1,6 m und mehr erhalten werden. Eine Begrenzung der Länge der Strukturierungsgräben kann z.B. durch die Länge des Moduls oder Substrats oder durch anlagentechnische Vorgaben gegeben sein, nicht jedoch durch das erfindungsgemäße Verfahren selber.

Das Verfüllen des ersten Strukturierungsgrabens mit dem Isolatormaterial und/oder das Verfüllen des zweiten Strukturierungsgrabens oder des ersten Volumenbereichs des vierten Strukturierungsgrabens mit leitfähigem Material erfolgt in einer bevorzugten Ausführungsform mit dem Ink-Jet- oder mit dem Aerosol-Jet-Verfahren. Mit dem Inkjet-Verfahren lassen sich das Isolatormaterial wie auch das leitfähige Material sehr fein dosieren, wie es z.B. auch aus der Tintenstrahl-Druckerindustrie bekannt ist. Beispielsweise können mittels Ink-Jet-Verfahren und/oder mit dem Aerosol-Jet-Verfahren Tröpfchen mit einem Volumen im Bereich von etwa 10 pico-Litern bis unter einem pico-Liter feindosiert und z.B. mit Präzisions-xyz-Tisch präzise justiert in die Strukturierungstrenngräben verfüllt bzw. gespritzt werden. Des Weiteren ermöglichen derartig geringe Tropfenvolumina auch eine nur teilweise Befüllung eines Strukturierungstrenngrabens, z.B. über Tropfengröße, Tropfen-Rate und/oder Vorschub und/oder durch entsprechende laterale Justage. Zum Beispiel kann der zweite Strukturierungsgraben über eine Höhe von etwa 3 Micrometer bei einer Breite von etwa

20 Micrometer verfügen. Bei einem derartigen Aspektverhältnis ist es z.B. ohne weiteres möglich, in einem einzigen Arbeitsgang den ersten Strukturierungstrenngraben vollständig mit Isolatormaterial und den zweiten Strukturierungstrenngraben teilweise, d.h. im ersten Volumenbereich, mit leitfähigem Material zu befüllen und außerdem eine leitfähige Brücke von diesem ausgefüllten ersten Volumenbereich zu der Frontelektrode der benachbarten Solarzelle zu bilden.

Als Verfüllmaterial für das Isolatormaterial kann zum Beispiel eine schnell härtende Isolatorfarbe oder ein UV-härtender elektrisch isolierender Lack verwendet werden, wie er aus der Halbleitertechnologie bekannt ist. Die UV-Beleuchtung erfolgt vorzugsweise unmittelbar nach dem Verfüllschritt.

Der vorliegenden Erfindung liegt die überraschende Erkenntnis zugrunde, dass sich durch die Abfolge der Strukturierungsprozesse, insbesondere in Kombination mit der einer Mehrschicht-Rückelektrode, enthaltend eine insbesondere bidirektionale Barrierschicht, photovoltaische Dünnschichtsolarmodule mit monolithisch integriert serienschalteten Solarzellen in der Massenfertigung in hoher Qualität und mit hohen Wirkungsgraden kosteneffizient und reproduzierbar erhalten lassen. Hierbei ist ferner von Vorteil, dass das Zell- und Modul-Formatdesign in weiten Bereichen auch in der Massenfertigung variierbar ist und entsprechende Kundenwünsche in großem Umfang berücksichtigt und umgesetzt werden können. Dieses trifft gleichfalls auf die vom Kunden für ein Dünnschichtsolarmodul gewünschte Leerlaufspannung und den Kurzschlussstrom zu. Dadurch dass die Strukturierung der Solarzellen erst nach der Abscheidung sämtlicher Schichten bis zur Frontelektrodenschicht stattfindet, werden auch keine Angriffspunkte für Beeinträchtigungen während der Herstellung der Halbleiterabsorberschicht geliefert, welche regelmäßig unter aggressiven Bedingungen stattfindet, d.h. bei hohen Temperaturen und in Anwesenheit von z.B. Selenwasserstoff, Schwefelwasserstoff, elementarem Selen- und/oder elementarem Schwefeldampf. Beispielsweise kann eine Unterwanderung von Einzelschichten unter Bildung von Metallchalkogeniden ausgeschlossen werden. Denn bei den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren werden die Strukturiergräben vor dem Halbleiterbildungsprozess hergestellt, weshalb die Strukturiergräben unter Einwirkung der bei der Halbleiterbildung angewendeten hohen Temperaturen und gegebenenfalls auch Alkalidiffusion im Bereich von 350°C bis 600°C stehen und unter Selen- bzw. Schwefeleinwirkung dann häufig korrodieren. Hiermit einhergehend erfolgen eine Schichtunterwanderung und die Bildung von Mikrorissen durch mechanischen Stress, hervorgerufen durch die Volumenexpansion der unter Selen-

und/oder Schwefeleinwirkung korrodierten Metalle. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren werden diese Nachteile umgangen. Demzufolge gelangt man zu Dünnschichtsystemen mit verbesserter Haftung und zu einem Schichtaufbau aus Einzelschichten, welche sich durch eine ebenere Oberfläche gegenüber nach Verfahren aus dem Stand der Technik erhaltenen Dünnschichtsolarmodulen auszeichnen. Grenzflächenrauhigkeiten bzw. Schichtdickenfluktuationen werden nicht mehr beobachtet. Ferner liegen während der Bildung der Halbleiterabsorberschicht keine aufgetrennten Rückelektroden mehr vor, so dass eine Oberflächenkorrosion an den Strukturgrabenflanken nicht mehr zu befürchten ist. Das Risiko von Mikrorissen wird hierdurch verringert oder gar unterbunden. Ferner kann die Bildung eines Strukturierungsrandes bei der Laserstrukturierung durch Aufschmelzen des Rückelektrodenmetalls vermieden werden. Ein solcher Schmelzrand ist im Allgemeinen besonders empfänglich für eine Reaktion mit Selen und/oder Schwefel unter den Bildungsbedingungen der Halbleiterabsorberschicht. Eine ausgeprägte Volumenexpansion mit der Folge von Mikrorissen kann häufig nicht verhindert werden. Derartige Probleme treten mit den erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen nicht mehr auf.

Von Vorteil bei den erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen ist auch, dass sich eine möglichst große photovoltaisch aktive Fläche verlässlich pro Solarzelle zur Verfügung stellen lässt, welche für die Energiegewinnung genutzt werden kann. Hierzu tragen die sehr schmal gestaltbaren Strukturierungstrenngräben ebenso bei wie die auf ein Mindestmaß einstellbaren Abstände zwischen benachbarten Strukturierungstrenngräben.

Das erfindungsgemäße Verfahren gestattet es zudem, die sonst häufig auftretende Schädigung der isolierenden Barrierschicht beim Laserprozess zu umgehen. Folglich kann verhindert werden, dass Alkaliionen unkontrolliert aus dem Substratglas in die Halbleiterabsorberschicht gelangen. Durch die Vermeidung der Überdotierung der Halbleiterabsorberschicht und durch das Verfüllen des Strukturiergrabens mit Isolatorfüllmaterial wird der gewünschte hohe Brückenwiderstand zwischen benachbarten Zellen gegenüber dem Stand der Technik deutlich verbessert, so dass ein signifikanter Füllfaktor- bzw. Wirkungsgradgewinn die Folge ist. Des Weiteren wird durch die kontrollierte Dotierung der Halbleiterabsorberschicht sichergestellt, dass durch Alkaliionen induzierte Haftungsprobleme der einzelnen Schichten bei dem nach dem erfindungsgemäßen Verfahren erhaltenen Dünnschichtsolarmodul nicht mehr auftreten.

Der Anteil an nicht zu verwendender Ausschussware kann damit drastisch verringert werden.

Mit den erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen lassen sich höhere Füllfaktoren und verbesserte Wirkungsgrade verwirklichen.

Als vorteilhaft hat sich auch erwiesen, dass sich mehrere Verfahrensschritte in einer einzigen Anlage durchführen lassen. Dieses trifft z.B. auf den ersten und zweiten Strukturierungsschritt und das Verfüllen des ersten Strukturierungstrenngrabens mit einem Isolatormaterial zu. Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt demgemäß eine kostengünstigere Prozessierung bei merklicher Leistungsverbesserung. Auch lässt sich die Halbleiterabsorberschicht wesentlich gezielter mit Dotierstoffen versehen.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachgehenden Beschreibung, in der bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung beispielhaft anhand schematischer Zeichnungen erläutert sind. Dabei zeigen:

- Figur 1 eine schematische Querschnittsansicht einer Fertigungsstufe einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls, erhalten nach einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Figur 2 eine schematische Querschnittsansicht einer nachfolgenden Fertigungsstufe des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls erhalten nach dem erfindungsgemäßen Verfahren;
- Figur 3 eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Fertigungsstufe des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls erhalten nach dem erfindungsgemäßen Verfahren;
- Figur 4 eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Fertigungsstufe des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls erhalten nach dem erfindungsgemäßen Verfahren;
- Figur 5 eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Fertigungsstufe des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls erhalten nach dem erfindungsgemäßen Verfahren;

- Figur 6 eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Fertigungsstufe des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls erhalten nach dem erfindungsgemäßen Verfahren;
- Figur 7 eine schematische Querschnittsansicht einer Fertigungsstufe einer alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls, erhalten gemäß einer alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens;
- Figur 8 eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Fertigungsstufe der alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls, aufbauend auf der Fertigungsstufe gemäß Fig. 7;
- Figur 9 eine schematische Querschnittsansicht einer Fertigungsstufe einer weiteren alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls, erhalten nach einer alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens; und
- Figur 10 eine schematische Querschnittsansicht einer weiteren Fertigungsstufe der alternativen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls, aufbauend auf der Fertigungsstufe gemäß Fig. 9.

Figur 1 entnimmt man eine schematische Querschnittsansicht einer intermediären Fertigungsstufe 1a eines erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls 1. Auf dem Glassubstrat 2 liegt mittels Dünnschichtabscheidung eine Bulk-Rückelektrodenschicht 4 z.B. aus Molybdän vor. Hieran angrenzend liegt eine bidirektionale, reflektierende Barrierschicht 6 aus z.B. TiN oder ZrN auf, die ebenfalls mittels Dünnschichtabscheidung erhalten werden kann. Auf der Barrierschicht 6 liegt in der dargestellten Ausführungsform eine Ohm'sche Kontaktschicht 8 aus einem Metallchalkogenid wie Molybdänselenid auf. Diese Kontaktschicht kann auf unterschiedliche Art und Weise, wie vorangehend bereits allgemein erläutert, erhalten werden. In einer Ausgestaltung ist z.B. Molybdänselenid aus einem Molybdänselenidtarget aufgesputtert worden. Alternativ kann zunächst eine Metallschicht aufgetragen werden, welche anschließend vor und/oder während der Bildung der Halbleiterabsorberschicht in das entsprechende Metallchalkogenid umgewandelt wird. Die Kontaktschicht 8 kann dabei in einer bevorzugten Ausführungsform auch mit mindestens einem Dotierstoff versetzt sein, beispielsweise Natriumionen oder einer Natriumverbindung, insbesondere Natriumsulfit

oder Natriumsulfid. Die Schicht 10 stellt die Halbleiterabsorberschicht dar und kann z.B. als Chalkopyrit- oder als Kesterit-Halbleiterabsorberschicht vorliegen. Verfahren zur Auftragung dieser Halbleiterabsorberschichten sind dem Fachmann bekannt. Liegt in der Kontaktschicht ein Dotierstoff vor, diffundiert dieser in der Regel unter den Bedingungen der Bildung der Halbleiterabsorberschicht in letztere. Mittels Dünnschichtabscheidung sind dann auf die Halbleiterabsorberschicht 10 zunächst die erste Pufferschicht 12 aus z.B. CdS, Zn(S,OH) oder In_2S_3 und die zweite Pufferschicht 14 aus intrinsischem Zinkoxid appliziert worden sowie anschließend die Frontelektrodenschicht 22 aus n-dotiertem Zinkoxid.

Die in Figur 1 dargestellte Schichtabfolge 2, 4, 6, und 8 eines erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls 1 kann in einer einzigen Anlage in einem im Wesentlichen zusammenhängenden Prozess gefertigt werden. Während der gesamten Prozessspanne kann in einer einzigen Anlage prozessiert werden. Somit werden nicht nur kostenträchtige Verfahrensschritte vermieden, sondern ebenfalls die Gefahr der Kontamination der Produktzwischenstufen, beispielsweise mit Sauerstoff, reduziert.

Figur 2 zeigt den an der Fertigungszwischenstufe 1a vorgenommenen ersten Strukturierungsschritt unter Erhalt der Fertigungsstufe 1b. Mittels Laserbehandlung von der Unterseite (angedeutet durch Pfeilsymbole) des transparenten Substrats 2 sind erste Trenngräben 16 erzeugt worden, welche letztendlich die Breiten der Solarzellen der monolithisch integrierten Serienschaltung festlegen. Durch den ersten Trenngraben 16 werden beispielsweise die Solarzellen 100 und 200 voneinander getrennt. Auf diese Weise sind z.B. über eine durchschnittliche Trenngrabenbreite von 15 μm entlang von Linien sämtliche oberhalb des Substrats vorliegenden Schichten entfernt worden, einschließlich der Frontelektrodenschicht.

Bei der in Figur 3 wiedergegebenen Fertigungsstufe 1c ist mittels Laserbehandlung ein zweiter Strukturierungsprozess an dem Schichtsystem, diesmal von der Oberseite, unter Ausbildung beabstandeter zweiter Trenngräben 20 vorgenommen worden. Von der Frontelektrodenschicht 22 über die Pufferschichten und die Halbleiterabsorberschicht 10 bis einschließlich der Kontaktschicht 8 sind bis zur Barrierenschicht sämtliche Schichten entfernt worden, vorzugsweise über eine durchschnittliche Breite von 15 μm . Diese zweiten Trenngräben 20 können auch mechanisch, z.B. mittels Nadelritzens erzeugt werden. Sie sind benachbart zu den ersten Trenngräben 16 angebracht und verfügen z.B.

über einen durchschnittlichen Abstand kleiner 50 μm , beispielsweise von etwa 30 μm . Erste und zweite Trenngräben 16, 20 liegen hier bevorzugt im Wesentlichen parallel vor.

Wie in Fig. 4 gezeigt, können die ersten Trenngräben 16, z.B. mittels Ink-Jet- oder Aerosol-Jet-Verfahren mit einem beispielsweise mit UV-Licht aushärtbaren Isolatormaterial 18 verfüllt werden. Hierbei sollte der erste Trenngraben er vorzugsweise, wie in Fig. gezeigt, bis zur Frontelektrodenschicht 22, d.h. oberhalb der zweiten Pufferschicht 14 mit dem Isolatormaterial 18 verfüllt sein, um spätere Kurzschlüsse im Wandungsbereich der Strukturierflanke auf der Zelle 200 zugewandten Seite zu vermeiden. Man erhält die Fertigungsstufe 1d.

Die Schritte der ersten und zweiten Laserstrukturierung sowie der Verfüllung der ersten Trenngräben mit Isolatormaterial können hierbei bevorzugt in ein und derselben Anlage durchgeführt werden. Hierdurch entfällt eine aufwendige Justage, vielmehr muss diese nur ein einziges Mal erfolgen. Auch können die ersten und zweiten Trenngräben in einem engeren Abstand zueinander angebracht werden, wodurch die photovoltaisch aktive Fläche des Dünnschichtsolarmoduls vergrößert wird.

Anschließend wird die Fertigungsstufe 1d zwecks Definition der Isolationsstruktur in der monolithisch integrierten Serienschaltung dem dritten Strukturierungsschritt unterzogen, bei dem dritte Trenngräben 24 erzeugt werden, die sich wie die zweiten Trenngräben 20 bis zur Barrierschicht 6 erstrecken, Fertigungsstufe 1e (siehe Figur 5). Sie sind benachbart zu den zweiten Trenngräben 20 angebracht und verfügen z.B. über einen durchschnittlichen Abstand kleiner 50 μm , beispielsweise von etwa 30 μm . Zweite und dritte Trenngräben 20, 24 liegen hier bevorzugt im Wesentlichen parallel vor. Die dritten Trenngräben 24 können mittels Laserbehandlung oder mechanisch, z.B. mittels Nadelritzens, erhalten werden. Die ersten, zweiten und dritten Trenngräben 16, 20 und 24 der Solarzelle 100 bilden zueinander benachbarte Trenngräben im Sinne der vorliegenden Erfindung.

Auf der nächsten, in Fig. 6 wiedergegebenen Verfahrensstufe werden in der dargestellten Ausführungsform die zweiten Trenngräben 20 mit einem hochleitfähigem Material 26 ortsgenau verfüllt und gleichzeitig eine leitfähige Brücke 28 mit diesem leitfähigen Material 26 entlang der Oberfläche der Frontelektrodenschicht 22 über den mit Isolatormaterial 18 verfüllten benachbarten ersten Trenngraben 16 hinweg zu der benachbarten Solarzelle 200, z.B. zu der Frontelektrodenschicht 22 dieser Solarzelle 200 erzeugt. Damit wird ein elektrisch leitender Kontakt zwischen der Rückelektrode 4 der ersten Solarzelle 100 zu

der Frontelektrode 22 der benachbarten Solarzelle 200 und mithin eine Serienschaltung sichergestellt. Der Auftrag des leitfähigen Materials kann z.B. mittels Ink-Jet- oder Aerosoljet-Verfahren erfolgen. Man erhält die Fertigungsstufe 1f.

Bei dem dargestellten Verfahren können die Zielformate der Dünnschichtsolarmodule in einer zweckmäßigen Ausgestaltung mittels Schneidens aus dem Ursprungsformat des Substrats nach der Fertigungsstufe 1f erhalten werden.

Vor oder nach dem Schneiden der Module können weitere gängige Verfahrensstufen angeschlossen werden, beispielsweise der Auftrag einer Laminierfolie und/oder die Anbringung einer Schutzglasschicht. Diese Verfahrensstufen sind dem Fachmann an sich geläufig.

Fig. 7 entnimmt man eine Alternative zu den vorangehend dargestellten Fertigungsstufen 1c und 1f. Anstelle zunächst den zweiten Trenngraben 20 zu erzeugen, um ihn anschließend mit leitfähigem Material zu verfüllen, kann man mittels gezielter Laserbehandlung begrenzt auf z.B. die Breite des zu der vorangehenden ersten Ausführungsform beschriebenen zweiten Trenngrabens einen hochleitfähigen Bereich 30, vorzugsweise parallel zum ersten Trenngraben 16, erzeugen, der einen leitfähigen Pfad von der Rückelektrode 4 zu der Frontelektrode 22 bildet. Durch den räumlich auf den Bereich 30 begrenzten thermischen Eintrag mittels gepulstem Laserlicht wird im vorliegenden Fall eine Phasenumwandlung der Schichten oberhalb der Barrierschicht zu dem hochleitfähigen Pfad herbeigeführt.

Wie in Fig. 8 zusammengefasst, kann sodann entsprechend den Fertigungsstufen 1d und 1e zunächst der erste Trenngraben 16 mit Isolatormaterial 18 verfüllt und anschließend der dritte Trenngraben 24 mechanisch oder mittels Laserbehandlung erzeugt werden. Hierauf folgt analog zu der vorangehend beschriebenen Fertigungsstufe 1f die Anbringung einer Brücke 28 aus leitfähigem Material 26 von dem ersten hochleitfähigen Bereich 30 der ersten Solarzelle 100 zu der Frontelektroden-schicht 22 der benachbarten zweiten Solarzelle 200 über den mit Isolatormaterial 18 befüllten ersten Trenngraben 16 hinweg. Auch auf diese Weise gelingt eine Serienschaltung von jeweils benachbarten Solarzellen des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls 1.

Fig. 9 zeigt eine weitere Alternative auf, um zu den erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmodulen zu gelangen. Zunächst wird ähnlich verfahren wie bei den vorangehend beschriebenen Fertigungsstufen 1a bis 1e, d.h. es werden erste und zweite

Trenngräben 16 und 20 erzeugt und der erste Trenngraben wird mit einem Isolatormaterial 18 verfüllt. Im Unterschied zu der in den Fig. 1 bis Fig. 5 gezeigten Vorgehensweise des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der zweite Trenngraben 20' der Ausführungsform gemäß Fig. 9 breiter ausgeführt als der zweite Trenngraben 20 gemäß Fig. 5. Im Falle eines ortsgenauen Verfahrens zur Aufbringung des leitfähigen Materials 26, wie beispielsweise durch ein Ink-Jet- oder Aerosoljet-Verfahren zur Verfügung gestellt, kann auch in dieser Ausführungsform der zweite Trenngraben 20' nicht breiter ausgestaltet sein als in den vorherigen Ausführungsformen gemäß Figuren 1 bis 5.

In dem sich anschließenden Verfahrensschritt wird, wie in Fig. 10 gezeigt, ein erster Volumenbereich 32 des zweiten Trenngrabens 20' mit einem aushärtbaren, leitfähigen Material 26 ortsgenau verfüllt, und zwar unter Freilassung/Auslassung des benachbarten zweiten Volumenbereichs 34. Gleichzeitig wird bei diesem Verfahrensschritt eine leitfähige Brücke 28 aus dem leitfähigen Material 26 von dem ersten Volumenbereich 32, der mit leitfähigem Material 26 ausgefüllt ist, der ersten Solarzelle 100 zu der Frontelektrodenschicht 22 der benachbarten zweiten Solarzelle 200 über den mit Isolatormaterial 18 befüllten ersten Trenngraben 16 hinweg erzeugt. Auch auf diese Weise gelingt eine Serienschaltung von jeweils benachbarten Solarzellen des erfindungsgemäßen Dünnschichtsolarmoduls 1. Der erste Volumenbereich 32 erstreckt sich dabei von der ersten Trenngrabenwand 36, benachbart zum benachbarten ersten Trenngraben 16, bis in einen Wandungsbereich 40 des leitfähigen Materials 26 beabstandet von der gegenüberliegenden zweiten Trenngrabenwand 38 des zweiten Trenngrabens 20'. Der zweite Volumenbereich 34 erstreckt sich demgemäß von der zweiten Trenngrabenwand 38 bis zu dem Wandungsbereich 40. Beide beginnen an der Barrierschicht 6 und gehen in Querausrichtung des Dünnschichtsolarmoduls 1 bis einschließlich zur Frontelektrode 22. Ein Kontakt des ersten Volumenbereichs 32 mit der zweiten Trenngrabenwand 38 ist zur Vermeidung von Kurzschlüssen zu vermeiden.

Die in der vorstehenden Beschreibung, in den Ansprüchen sowie in den Zeichnungen offenbarten Merkmale der Erfindung können sowohl einzeln als auch in jeder beliebigen Kombination für die Verwirklichung der Erfindung in ihren verschiedenen Ausführungsformen wesentlich sein.

Patentansprüche

1. Photovoltaisches Dünnschichtsolarmodul, umfassend, insbesondere in dieser Reihenfolge,
mindestens eine Substratschicht,
mindestens eine, insbesondere an der Substratschicht unmittelbar anliegende, Rückelektrodenschicht,
mindestens eine, insbesondere an der Rückelektrodenschicht und/oder der Substratschicht unmittelbar anliegende, leitfähige Barrierschicht,
mindestens eine, insbesondere an der Barrierschicht unmittelbar anliegende, Kontaktschicht, insbesondere Ohm'sche Kontaktschicht,
mindestens eine, insbesondere an der Kontaktschicht unmittelbar anliegende, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere Chalkopyrit- oder Kesterit-Halbleiterabsorberschicht,
gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht unmittelbar anliegende, erste Pufferschicht, enthaltend oder im Wesentlichen aus CdS oder einer CdS-freien Schicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus $\text{Zn}(\text{S},\text{OH})$ oder In_2S_3 , und/oder
gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht oder der ersten Pufferschicht unmittelbar anliegende, zweite Pufferschicht, enthaltend und im Wesentlichen aus intrinsischem Zinkoxid und/oder hochohmigem Zinkoxid, und
mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht, der ersten Pufferschicht und/oder der zweiten Pufferschicht unmittelbar anliegende, transparente Frontelektrodenschicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus n-dotiertem Zinkoxid, gekennzeichnet durch beabstandete erste, mit mindestens einem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen bis zur Substratschicht voneinander trennen,
beabstandete zweite, mit mindestens einem leitfähigen Material befüllte oder versehene Strukturierungstrenngräben, welche sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur Barrierschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem befüllten ersten

Strukturierungstrenngraben vorliegen, beabstandete dritte Strukturierungstrenngräben, welche sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur Barrierschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem zweiten Strukturierungsgraben, jenseits des ersten Strukturierungsgrabens, zu welchem der zweite Strukturierungstrenngraben benachbart ist, vorliegen, und mindestens eine leitfähige Brücke von mit einem leitfähigen Material befüllten oder mit einem solchen Material versehenen zweiten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle.

2. Photovoltaisches Dünnschichtsolarmodul, umfassend, insbesondere in dieser Reihenfolge, mindestens eine Substratschicht, mindestens eine, insbesondere an der Substratschicht unmittelbar anliegende, Rückelektrodenschicht, mindestens eine, insbesondere an der Rückelektrodenschicht und /oder der Substratschicht unmittelbar anliegende, leitfähige Barrierschicht, mindestens eine, insbesondere an der Barrierschicht unmittelbar anliegende, Kontaktschicht, insbesondere Ohm'sche Kontaktschicht, mindestens eine, insbesondere an der Kontaktschicht unmittelbar anliegende, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere Chalkopyrit- oder Kesterit-Halbleiterabsorberschicht, gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht unmittelbar anliegende, erste Pufferschicht, enthaltend oder im Wesentlichen aus CdS oder einer CdS-freien Schicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus $\text{Zn}(\text{S},\text{OH})$ oder In_2S_3 , und/oder gegebenenfalls mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht oder der ersten Pufferschicht unmittelbar anliegende, zweite Pufferschicht, enthaltend und im Wesentlichen aus intrinsischem Zinkoxid und/oder hochohmigem Zinkoxid, und mindestens eine, insbesondere an der Halbleiterabsorberschicht, der ersten Pufferschicht und/oder der zweiten Pufferschicht unmittelbar anliegende, transparente Frontelektrodenschicht, insbesondere enthaltend oder im Wesentlichen aus n-dotiertem Zinkoxid, gekennzeichnet durch

beabstandete erste, mit mindestens einem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen bis zur Substratschicht voneinander trennen, beabstandete vierte Strukturierungstrenngräben, die sich bis zur Kontaktschicht oder bis zur Rückelektrodenschicht oder bis zur Barrierschicht, insbesondere bis zur Barrierschicht, erstrecken und jeweils benachbart zu einem befüllten ersten Strukturierungstrenngraben vorliegen und die einen ersten Volumenbereich, der sich von der Barrierschicht bis zur Frontelektrodenschicht entlang der zum ersten Strukturierungstrenngraben benachbarten Trenngrabenwand erstreckt und der mit mindestens einem leitfähigen Material ausgefüllt oder versehen ist, und einen hierzu benachbarten zweiten Volumenbereich, der sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis zur Frontelektrodenschicht erstreckt, umfassen, und mindestens eine leitfähige Brücke von den mit einem leitfähigen Material ausgefüllten oder mit einem solchen Material versehenen ersten Volumenbereichen der zweiten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit einem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle.

3. Dünnschichtsolarmodul nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterabsorberschicht eine quaternäre IB-III_A-VI_A-Chalkopyritschicht, insbesondere eine Cu(In,Ga)Se₂-Schicht, eine penternäre IB-III_A-VI_A-Chalkopyritschicht, insbesondere eine Cu(In,Ga)(Se_{1-x},S_x)₂-Schicht, oder eine Kesterit-Schicht, insbesondere eine Cu₂ZnSn(Se_x,S_{1-x})₄-Schicht, z.B. eine Cu₂ZnSn(Se)₄- oder eine Cu₂ZnSn(S)₄-Schicht, darstellt oder umfasst, wobei x Werte von 0 bis 1 annimmt.
4. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat eine Glasscheibe, eine Kunststoffschicht oder eine Metallplatte, insbesondere mit einer Breite größer 0,5 m, insbesondere größer 2,0 m, und einer Länge größer 1,2 m, insbesondere größer 3,0 m, darstellt.
5. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

die Rückelektrodenschicht enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus V, Mn, Cr, Mo, Ti, Co, Zr, Ta, Nb und/oder W und/oder enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus einer Legierung enthaltend V, Mn, Cr, Mo, Ti, Co, Fe, Ni, Al, Zr, Ta, Nb und/oder W.

6. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die Barrierschicht eine Barriere für aus der und/oder über die Rückelektrodenschicht migrierende, insbesondere diffundierende bzw. diffundierbare, Komponenten und/oder für aus der und/oder über die Kontaktschicht migrierende, insbesondere diffundierende bzw. diffundierbare, Komponenten, insbesondere eine bidirektionale Barrierschicht, darstellt.
7. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die Barrierschicht eine Barriere für Alkaliionen, insbesondere Natriumionen, oder Verbindungen enthaltend Alkaliionen, Selen oder Selenverbindungen, Schwefel oder Schwefelverbindungen und/oder Metalle, insbesondere Cu, In, Ga, Fe, Ni, Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Al und/oder W, darstellt.
8. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die Barrierschicht enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus mindestens einem Metallnitrid, insbesondere TiN, MoN, TaN, ZrN und/oder WN, mindestens einem Metallecarbide, mindestens einem Metalleboride und/oder mindestens einem Metalleiliziumnitrid, insbesondere TiSiN, TaSiN und/oder WSiN.
9. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die Kontaktschicht enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus Mo, W, Ta, Nb, Zr und/oder Co, insbesondere Mo und/oder W, und/oder mindestens ein Metallechalkogenide enthält oder hieraus im Wesentlichen gebildet ist und/oder
mindestens eine erste Lage, benachbart zur Barrierschicht, enthaltend oder im Wesentlichen aus Mo, W, Ta, Nb, Zr und/oder Co, insbesondere Mo und/oder W,

und mindestens eine zweite Lage, nicht benachbart zur Barrierschicht, enthaltend oder im Wesentlichen aus mindestens einem Metallchalkogenid, umfasst.

10. Dünnschichtsolarmodul nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass das Metall des Metallchalkogenids der Kontaktschicht bzw. der zweiten Lage der Kontaktschicht ausgewählt ist aus Molybdän, Wolfram, Tantal, Zirkonium, Cobalt und/oder Niob und dass das Chalkogen des Metallchalkogenids ausgewählt ist aus Selen und/oder Schwefel, wobei das Metallchalkogenid insbesondere MSe_2 , MS_2 und/oder $M(Se_{1-x},S_x)_2$ darstellt mit $M = Mo, W, Ta, Zr, Co$ oder Nb , wobei x Werte von 0 bis 1 annimmt.
11. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Metall der ersten Lage und das Metall der zweiten Lage der Kontaktschicht übereinstimmen und/oder dass das Metall der ersten Lage und/oder das Metall der zweiten Lage der Kontaktschicht mit dem Metall der Rückelektrodenschicht übereinstimmen und/oder dass das Metall der Kontaktschicht mit dem Metall der Rückelektrodenschicht übereinstimmen.
12. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterabsorberschicht mindestens einen Dotierstoff, insbesondere mindestens ein Element ausgewählt aus der Gruppe Natrium, Kalium und Lithium und/oder mindestens eine Verbindung dieser Elemente, vorzugsweise mit Sauerstoff, Selen, Schwefel, Bor und/oder Halogenen, z.B. Jod, , oder Fluor, und/oder mindestens eine Alkalimetallbronze, insbesondere Natrium- und/oder Kaliumbronze, vorzugsweise mit einem Metall ausgewählt aus Molybdän, Wolfram, Tantal und/oder Niob, aufweist.
13. Dünnschichtsolarmodul nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass der Dotierstoff, insbesondere Natriumionen, in der Kontaktschicht und/oder der Halbleiterabsorberschicht in einer Dosis im Bereich von 10^{13} bis 10^{17} Atomen/cm² insbesondere im Bereich von 10^{14} bis 10^{16} Atomen/cm², vorliegt.

14. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die durchschnittliche Dicke der Rückelektrodenschicht im Bereich von 50 nm bis 500 nm, insbesondere im Bereich von 80 nm bis 250 nm, und/oder die der Barrierschicht im Bereich von 10 nm bis 250 nm, insbesondere im Bereich von 20 nm bis 150 nm, und/oder die der Kontaktschicht im Bereich von 2 nm bis 200 nm, insbesondere im Bereich von 5 nm bis 100 nm, und/oder die der Halbleiterabsorberschicht im Bereich von 400 nm bis 2500 nm, insbesondere im Bereich von 500 nm bis 2000 nm und vorzugsweise im Bereich von 800 nm bis 1600 nm, und/oder die der ersten Pufferschicht im Bereich von 5 nm bis 100 nm, insbesondere im Bereich von 10 nm bis 70 nm, und/oder die der zweiten Pufferschicht im Bereich von 10 nm bis 150 nm, insbesondere im Bereich von 20 nm bis 100 nm, liegt.
15. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die Rückelektrodenschicht Molybdän und/oder Wolfram, insbesondere Molybdän, enthält oder im Wesentlichen aus Molybdän und/oder Wolfram, insbesondere Molybdän, gebildet ist,
die leitfähige Barrierschicht TiN enthält oder im Wesentlichen aus TiN gebildet ist, und
die Kontaktschicht MoSe₂ enthält oder im Wesentlichen aus MoSe₂ gebildet ist.
16. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die ersten, zweiten, dritten und/oder vierten Strukturierungstrenngräben mindestens abschnittsweise, insbesondere vollständig, eine durchschnittliche Breite von nicht mehr als 50 µm, insbesondere von nicht mehr als 30 µm und vorzugsweise von nicht mehr als 15 µm, aufweisen.
17. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass,
insbesondere benachbarte, erste und zweite und/oder, insbesondere benachbarte, erste und dritte und/oder, insbesondere benachbarte, zweite und dritte Strukturierungsgräben, oder, insbesondere benachbarte, erste, zweite und dritte

Strukturierungsgräben oder, insbesondere benachbarte, erste und vierte Strukturierungstrenngräben mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel verlaufen.

18. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte vierte Strukturierungstrenngräben mindestens abschnittsweise einen durchschnittlichen Abstand im Bereich von 3 mm bis 10 mm, insbesondere von 4 mm bis 8 mm, aufweisen.
19. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
benachbarte erste und zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite und dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben mindestens abschnittsweise, insbesondere vollständig, einen durchschnittlichen Abstand im Bereich von 5 μm bis 100 μm , insbesondere im Bereich von 10 μm bis 50 μm , aufweisen.
20. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass
die ersten Strukturierungstrenngräben mit dem Isolator über das Niveau der Kontaktschicht, insbesondere über das Niveau der Halbleiterabsorberschicht, hinaus mit dem Isolator befüllt sind und/oder dass der Brückenwiderstand über den mit Isolator befüllten ersten Strukturierungstrenngraben größer 50 k Ω m, insbesondere größer 100 k Ω m, ist.
21. Dünnschichtsolarmodul nach einem der vorangehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch
mindestens zwei, insbesondere eine Vielzahl an, monolithisch integriert serienverschalteten Solarzellen.

22. Verfahren zur Herstellung eines Dünnschichtsolarmoduls nach einem der Ansprüche 1 und 3 bis 21, soweit diese direkt oder indirekt auf den Anspruch 1 rückbezogen sind, umfassend:
- a) Zurverfügungstellung einer, insbesondere flächigen, Substratschicht,
 - b) Aufbringen mindestens einer Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Substratschicht,
 - c) Aufbringen mindestens einer leitfähigen Barrierschicht, insbesondere auf der Substratschicht oder der Rückelektrodenschicht oder auf der Substratschicht und auf der Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Rückelektrodenschicht, welche unmittelbar auf der Substratschicht angebracht worden ist,
 - d) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Ohm'schen, Kontaktschicht, insbesondere auf der Barrierschicht,
 - e) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Kesterit- oder Chalkopyrit-, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere auf der Kontaktschicht,
 - f) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer ersten Pufferschicht, insbesondere auf der Halbleiterabsorberschicht,
 - g) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer zweiten Pufferschicht, insbesondere auf der ersten Pufferschicht oder der Halbleiterabsorberschicht,
 - h) Aufbringen mindestens einer transparenten Frontelektrodenschicht, insbesondere auf der Halbleiterabsorberschicht oder der ersten oder zweiten Pufferschicht,
 - i) mindestens einen ersten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen der auf die Substratschicht aufgetragenen Schichten entlang voneinander beabstandeter Linien mittels Laserbehandlung (erste Laserbehandlung) unter Ausbildung erster Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen trennen,
 - j) mindestens einen zweiten Strukturierungsschritt, umfassend
 - j1) Entfernen derjenigen Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang voneinander beabstandeter Linien unter Ausbildung zweiter Strukturierungstrenngräben, welche zu ersten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen,
 - oder

- j2) chemische Phasenumwandlung und/oder thermischer Zersetzung derjenigen Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang voneinander beabstandeter Linien unter Ausbildung erster linienförmiger leitfähiger Bereiche, welche zu ersten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen,
- k) mindestens einen dritten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen der Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang voneinander beabstandeter Linien unter Ausbildung dritter Strukturierungstrenngräben, welche zu zweiten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen,
- l) Füllen der ersten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem Isolatormaterial,
- m) Füllen der zweiten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem leitfähigen Material,
- n) Ausbilden mindestens einer leitfähigen Brücke mit einem leitfähigen Material von den mit leitfähigem Material befüllten zweiten Strukturierungstrenngräben oder den ersten linienförmigen leitfähigen Bereichen über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen elektrisch serienschaltet werden.
23. Verfahren zur Herstellung eines Dünnschichtsolarmoduls nach einem der Ansprüche 2 bis 21, umfassend:
- a) Zurverfügungstellung einer, insbesondere flächigen, Substratschicht,
- b) Aufbringen mindestens einer Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Substratschicht,
- c) Aufbringen mindestens einer leitfähigen Barrierschicht, insbesondere auf der Substratschicht oder auf der Rückelektrodenschicht oder auf der Substratschicht und auf der Rückelektrodenschicht, insbesondere auf der Rückelektrodenschicht, welche unmittelbar auf die Substratschicht aufgebracht worden ist,

- d) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Ohm'schen, Kontaktschicht, insbesondere auf der Barrierschicht,
- e) Aufbringen mindestens einer, insbesondere Kesterit- oder Chalkopyrit-, Halbleiterabsorberschicht, insbesondere auf der Kontaktschicht,
- f) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer ersten Pufferschicht, insbesondere auf der Halbleiterschicht,
- g) gegebenenfalls Aufbringen mindestens einer zweiten Pufferschicht, insbesondere auf der ersten Pufferschicht oder auf der Halbleiterabsorberschicht,
- h) Aufbringen mindestens einer transparenten Frontelektrodenschicht, insbesondere auf der Halbleiterabsorberschicht oder auf der ersten oder zweiten Pufferschicht,
- i) mindestens einen ersten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen der auf die Substratschicht aufgetragenen Schichten entlang voneinander beabstandeter Linien mittels Laserbehandlung (erste Laserbehandlung) unter Ausbildung erster Strukturierungstrenngräben, welche benachbarte Solarzellen trennen,
- o) mindestens einen vierten Strukturierungsschritt, umfassend Entfernen derjenigen Schichten, die sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis einschließlich zu der Frontelektrodenschicht erstrecken, entlang von einander beabstandeter Linien unter Ausbildung vierter Strukturierungstrenngräben, welche zu ersten Strukturierungstrenngräben benachbart sind oder an diese angrenzen und insbesondere mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel zu diesen verlaufen,
- p) Füllen der ersten Strukturierungstrenngräben mit mindestens einem Isolatormaterial,
- q) Füllen eines ersten Volumenbereichs der vierten Strukturierungstrenngräben, der sich von der Kontaktschicht oder von der Rückelektrodenschicht oder von der Barrierschicht, insbesondere von der Barrierschicht, bis zur Frontelektrodenschicht entlang der zum ersten Strukturierungstrenngraben benachbarten Trenngrabenwand erstreckt mit mindestens einem leitfähigen Material, unter Nichtbefüllung/Freilassung eines hierzu benachbarten zweiten Volumenbereichs, der sich von der Barrierschicht bis zur Frontelektrodenschicht entlang derjenigen Trenngrabenwand erstreckt, die nicht zum ersten Strukturierungstrenngraben benachbart ist,

- r) Ausbilden mindestens einer leitfähigen Brücke mit einem leitfähigen Material von den mit leitfähigem Material befüllten ersten Volumenbereichen der vierten Strukturierungstrenngräben über benachbarte erste, mit dem Isolatormaterial befüllte Strukturierungstrenngräben zu der Frontelektrodenschicht der hierzu benachbarten Solarzelle, so dass benachbarte Solarzellen elektrisch serienschaltet werden.
24. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Schritte m) und n) zu einem Schritt s) zusammengefasst sind.
25. Verfahren nach Anspruch 22 oder 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Reihenfolge der Schritte i), j1), k), l) und m) beliebig ist, solange l), unmittelbar oder mittelbar, nach i) kommt und m), unmittelbar oder mittelbar, nach j1) kommt, insbesondere die Abfolge i), j1), l), k), m) und n) oder i), j1), l), k) und s), umfasst, oder dass die Reihenfolge der Schritte i), j2), k) und l) beliebig ist, solange l), unmittelbar oder mittelbar, nach i) kommt, insbesondere die Abfolge i), j2), l), k) und n) umfasst.
26. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die Schritte q) und r) zu einem Schritt t) zusammengefasst sind.
27. Verfahren nach Anspruch 23 oder 26, dadurch gekennzeichnet, dass die Reihenfolge der Schritte i), o), p) und q) beliebig ist, solange p), unmittelbar oder mittelbar, nach i) kommt und q), unmittelbar oder mittelbar, nach o) kommt, insbesondere die Abfolge i), o), p), q) und r) oder i), o), p) und t) umfasst.
28. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 27, dadurch gekennzeichnet, dass das Substrat zumindest bereichsweise für elektromagnetische Strahlung der ersten Laserbehandlung durchlässig ist und/oder dass die Laserbehandlung des ersten Strukturierungsschritts, insbesondere durch Laserablation, von der der beschichteten Seite des Substrats abgewandten Seite erfolgt.
29. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 28, dadurch gekennzeichnet, dass in dem zweiten und/oder dritten und/oder vierten, insbesondere dem zweiten, Strukturierungsschritt die zweiten, dritten bzw. vierten Strukturierungstrenngräben

mittels Laserbehandlung (zweite, dritte bzw. vierte Laserbehandlung) erzeugt werden und/oder dass in dem zweiten und/oder dritten und/oder vierten, insbesondere dem dritten und/oder vierten, Strukturierungsschritt die zweiten, dritten bzw. vierten Strukturierungstrenngräben mechanisch, insbesondere mittels Nadelritzens, erzeugt werden.

30. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 29, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten, zweiten, dritten und/oder vierten Strukturierungstrenngräben und/oder die ersten linienförmigen leitfähigen Bereiche mindestens abschnittsweise, insbesondere vollständig, mit einer durchschnittlichen Breite von nicht mehr als 50 μm , insbesondere von nicht mehr als 30 μm und vorzugsweise von nicht mehr als 15 μm , erzeugt werden.
31. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 30, dadurch gekennzeichnet, dass, insbesondere benachbarte, erste und zweite und/oder, insbesondere benachbarte, erste und dritte und/oder, insbesondere benachbarte, zweite und dritte Strukturierungsgräben, oder, insbesondere benachbarte, erste, zweite und dritte Strukturierungsgräben oder, insbesondere benachbarte, erste und vierte Strukturierungstrenngräben oder, insbesondere benachbarte, erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche mindestens abschnittsweise im Wesentlichen parallel geführt werden.
32. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 31, dadurch gekennzeichnet, dass benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte vierte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste linienförmige leitfähige Bereiche mindestens abschnittsweise in einem durchschnittlichen Abstand von im Bereich von 3 mm bis 10 mm, insbesondere von 4 mm bis 8 mm, erzeugt werden.
33. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 32, dadurch gekennzeichnet, dass benachbarte erste und zweite Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte zweite und dritte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben und/oder benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche mindestens

abschnittsweise, insbesondere vollständig, in einem durchschnittlichen Abstand im Bereich von 5 μm bis 100 μm , insbesondere im Bereich von 10 μm bis 50 μm , erzeugt werden.

34. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 33, dadurch gekennzeichnet, dass benachbarte erste, zweite und dritte oder benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben oder benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche einen geringeren durchschnittlichen Abstand zueinander aufweisen als nicht benachbarte erste, zweite und dritte bzw. nicht benachbarte erste und vierte Strukturierungstrenngräben oder nicht benachbarte erste Strukturierungstrenngräben und erste linienförmige leitfähige Bereiche.
35. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 34, dadurch gekennzeichnet, dass dritte Strukturierungstrenngräben, insbesondere sämtliche dritten Strukturierungstrenngräben, durch den jeweils benachbarten zweiten Strukturierungstrenngraben oder den ersten linienförmigen leitfähigen Bereich von dem jeweils benachbarten ersten Strukturierungstrenngraben separiert sind.
36. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 35, dadurch gekennzeichnet, dass die, insbesondere mindestens einen Dotierstoff enthaltende, Kontaktschicht enthält oder im Wesentlichen gebildet ist aus Molybdän, Tantal, Zirkonium, Cobalt, Niob und/oder Wolfram (erste Metalllage) und/oder mindestens einem Metallchalkogenid ausgewählt aus Metallselenid, Metallsulfid und/oder Metallsulfoselenid mit Metall = Mo, W, Ta, Zr, Co oder Niob, insbesondere ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus MoSe_2 , WSe_2 , MoS_2 , WS_2 , $\text{Mo}(\text{Se}_{1-x}, \text{S}_x)_2$ und/oder $\text{W}(\text{Se}_{1-x}, \text{S}_x)_2$, wobei x Werte von 0 bis 1 annimmt.
37. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 36, dadurch gekennzeichnet, dass die Halbleiterabsorberschicht eine quaternäre IB-III_A-VIA-Chalkopyritschicht, insbesondere eine $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ -Schicht, eine penternäre IB-III_A-VIA-Chalkopyritschicht, insbesondere eine $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})(\text{Se}_{1-x}, \text{S}_x)_2$ -Schicht, oder eine Kesterit-Schicht, insbesondere eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se}_x, \text{S}_{1-x})_4$ -Schicht, z.B. eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{Se})_4$ - oder eine $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S})_4$ -Schicht, darstellt oder umfasst, wobei x Werte von 0 bis 1 annimmt.

38. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 37, dadurch gekennzeichnet, dass durch das Aufbringen der Kesterit- oder Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht auf der Kontaktschicht in der Kontaktschicht vorliegende Metalle oder diese Kontaktschicht bildende Metalle vollständig oder partiell zu Metallseleniden, Metallsulfiden und/oder Metallsulfoseleniden umgewandelt werden.
39. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 38, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Laserbehandlung, die zweite Laserbehandlung und/oder die dritte Laserbehandlung mit Laserlichtpulsen mit einer Pulsdauer im Bereich von 1 pico-Sekunden bis 1nano-Sekunde erfolgen.
40. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 39, dadurch gekennzeichnet, dass der erste, zweite und dritte Strukturierungsschritt oder der erste und vierte Strukturierungsschritt zu einer monolithisch integrierten Serienschaltung der Solarzellen führen oder beitragen und insbesondere als linienhafte Prozessierschritte ausgestaltet sind.
41. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 40, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt des Aufbringens der Halbleiterabsorberschicht, insbesondere der Kesterit- oder Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht, umfasst: die Abscheidung von, insbesondere sämtlichen, metallischen Komponenten der Halbleiterabsorberschicht, insbesondere von Kupfer, Indium und gegebenenfalls Gallium für die Chalkopyrit-Halbleiterabsorberschicht und Kupfer, Zink und Zinn für die Kesterit-Halbleiterabsorberschicht, auf der Kontaktschicht unter Ausbildung einer zweiten Metalllage und das Behandeln dieser zweiten Metalllage mit Selen und/oder einer Selenverbindung sowie gegebenenfalls mit Schwefel und/oder einer Schwefelverbindung.
42. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 41, dadurch gekennzeichnet, dass die Rückelektrodenschicht, die leitfähige Barrierschicht, die erste Metalllage, insbesondere enthaltend Mo, die Kontaktschicht, die zweite Metalllage, insbesondere enthaltend Cu, In und Ga, die erste Pufferschicht, die zweite Pufferschicht und/oder die Frontelektrodenschicht erhalten werden mittels physikalischer Gasphasenabscheidung, insbesondere umfassend Physical Vapor

Deposition (PVD)-Beschichtung, Aufdampfen mittels eines Elektronenstrahl-Verdampfers, Aufdampfen mittels eines Widerstandsverdampfers, Induktionsverdampfung, ARC-Verdampfung und/oder Kathodenzerstäubung (Sputter-Beschichtung), insbesondere DC- oder RF-Magnetron-Sputtern, jeweils vorzugsweise in einem Hochvakuum, oder mittels chemischer Gasphasenabscheidung, insbesondere umfassend Chemical Vapour Deposition (CVD), Niederdruck- (low pressure) CVD und/oder Atmosphären- (atmospheric pressure) CVD.

43. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 42, dadurch gekennzeichnet, dass das Aufbringen der Rückelektrodenschicht, der leitfähigen Barrierschicht, der ersten Metalllage oder der Kontaktschicht und der zweiten Metalllage in einer einzigen Vakuum-Beschichtungsanlage, vorzugsweise im Durchlauf-Sputterverfahren, erfolgen.
44. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 43, dadurch gekennzeichnet, dass der erste und der zweite Strukturierungsschritt und der Schritt des Verfüllens des ersten Strukturierungsgrabens mit dem Isolatormaterial in einer einzigen Anlage erfolgen.
45. Verfahren nach einem der Ansprüche 22 bis 44, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfüllen des ersten Strukturierungsgrabens mit dem Isolatormaterial und/oder das Verfüllen des zweiten Strukturierungsgrabens oder des ersten Volumenbereichs des vierten Strukturierungsgrabens mit dem leitfähigen Material mit dem Ink-Jet-Verfahren oder mit dem Aerosoljet-Verfahren erfolgt.

Fig. 1

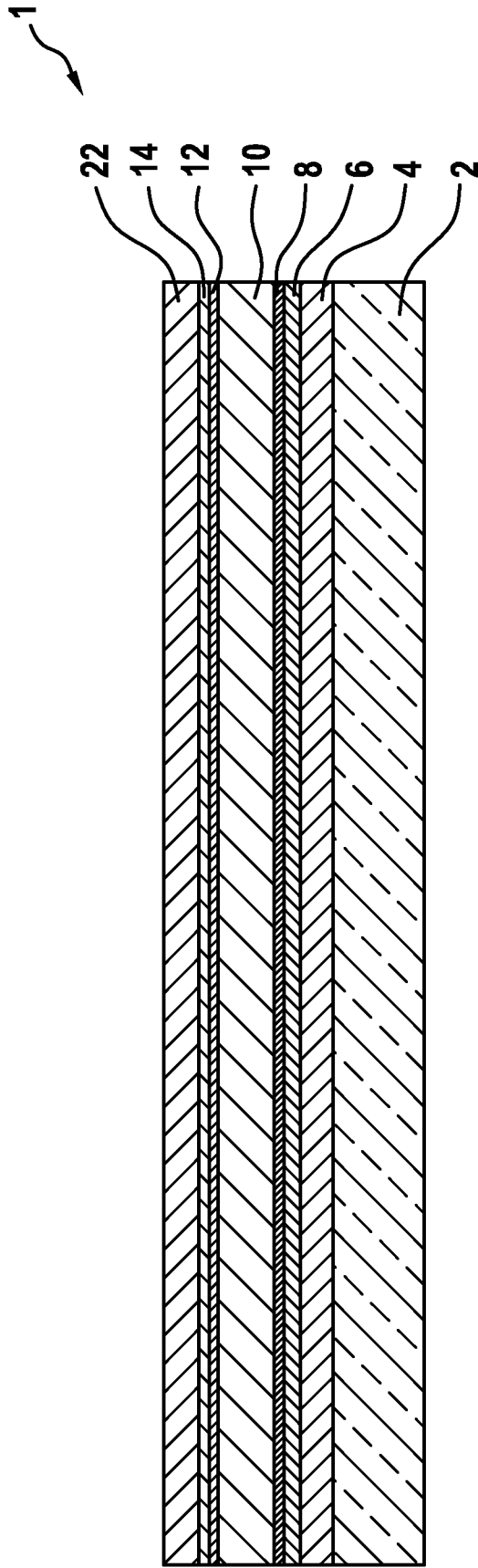


Fig. 2

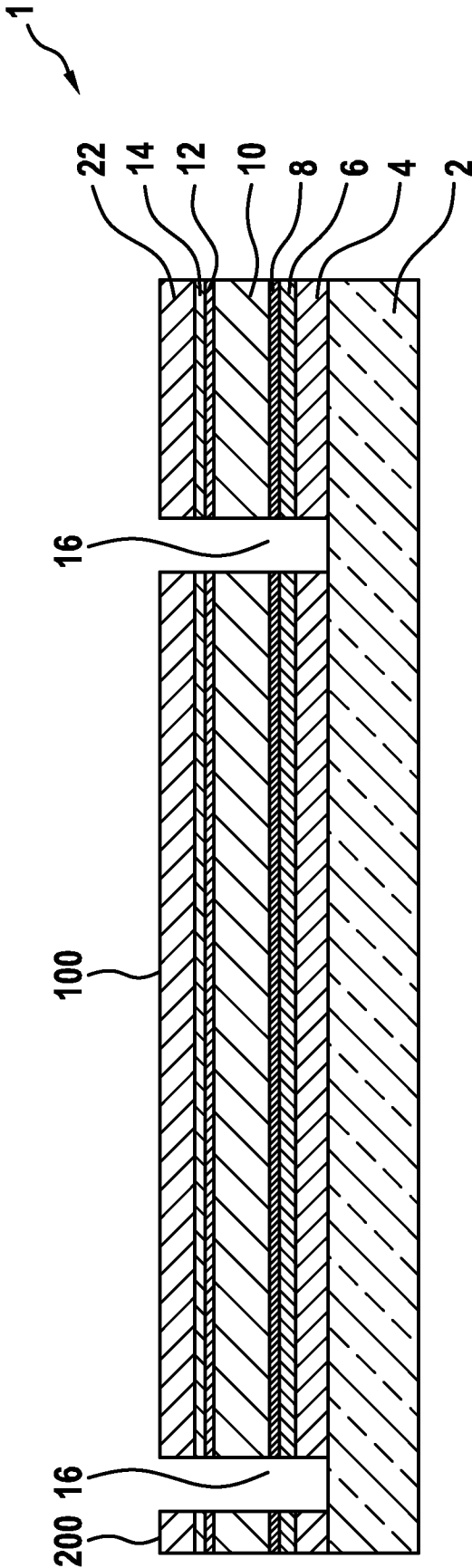


Fig. 3

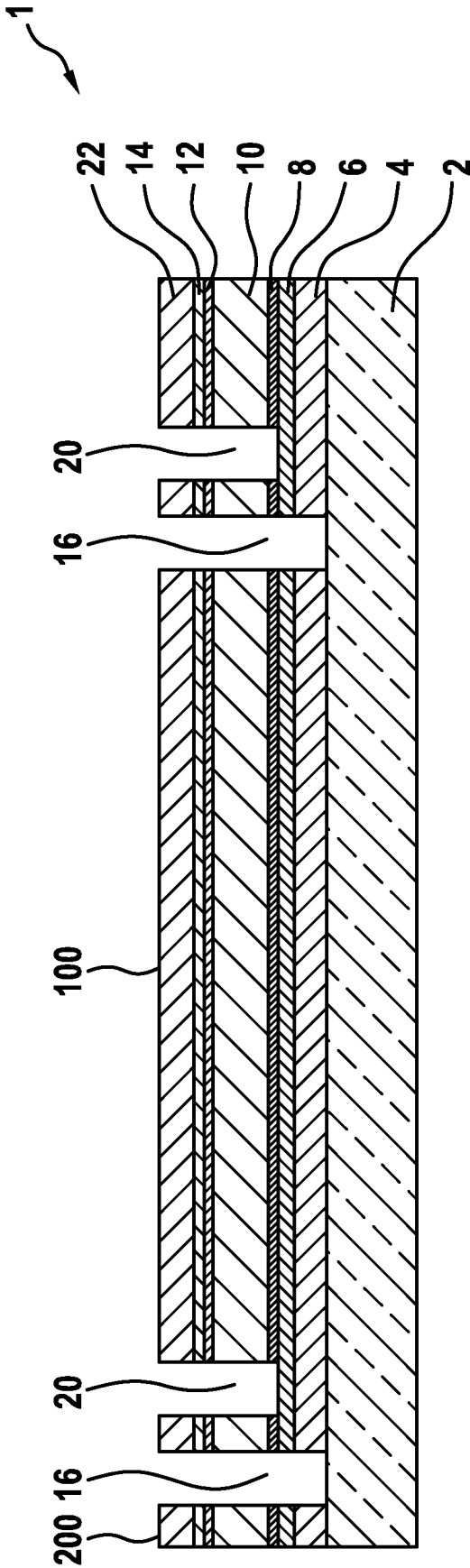


Fig. 4

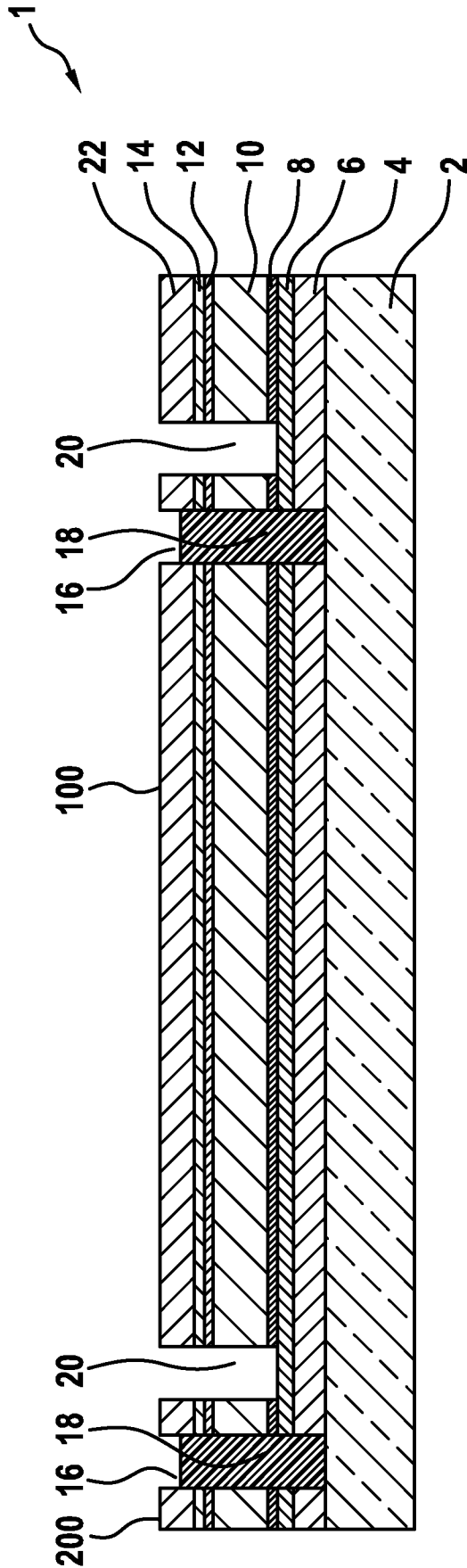


Fig. 5

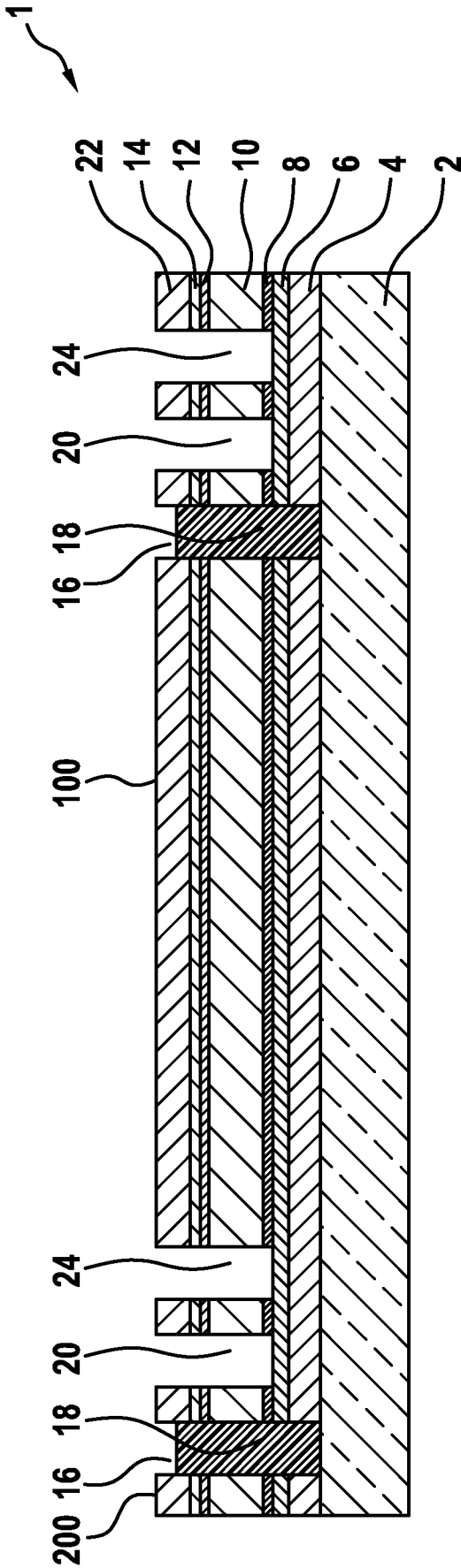


Fig. 6

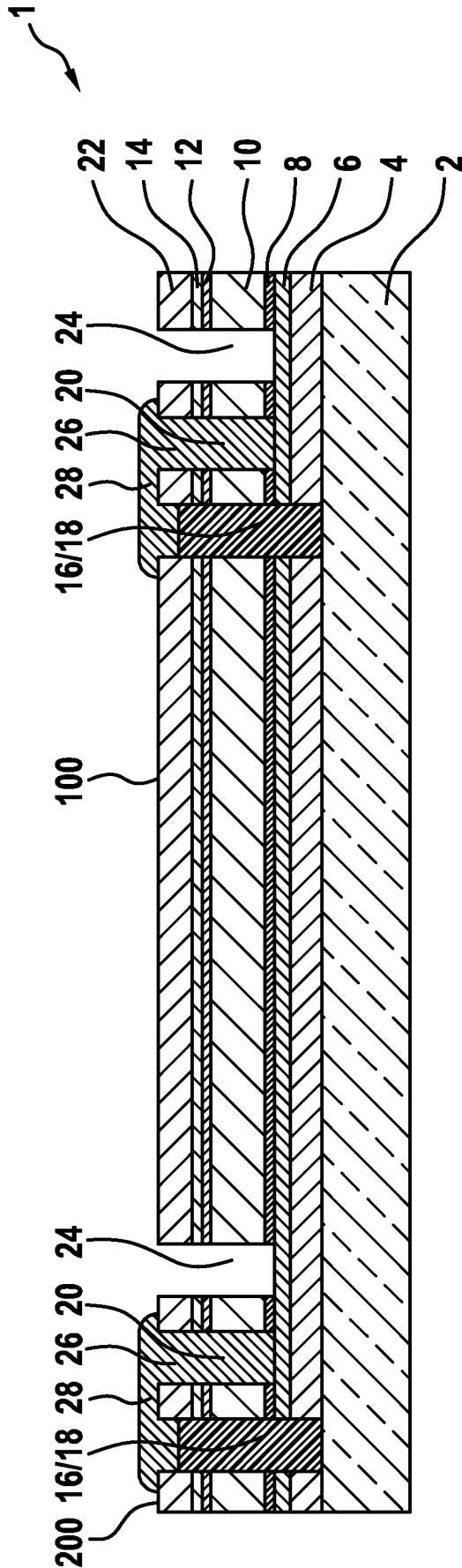


Fig. 7

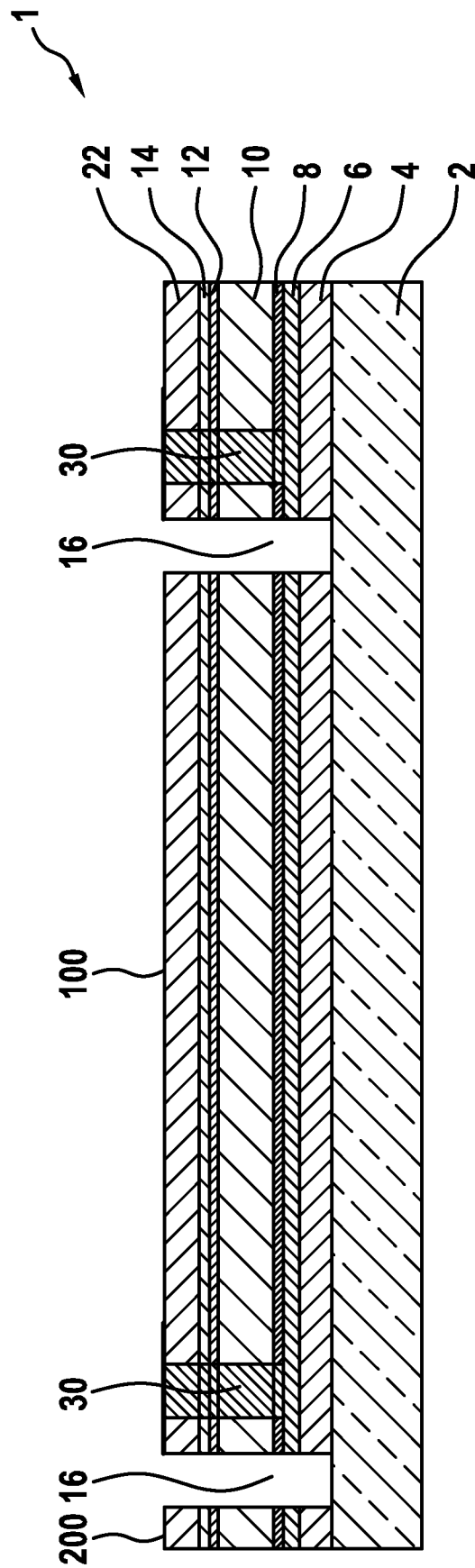


Fig. 8

