CH 683730 A5

(19) SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
BUNDESAMT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

(11) CH 683730 A5

(51) Int. Cl.[5]: H 01 L 31/048

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) PATENTSCHRIFT A5

(21) Gesuchsnummer: 2623/91

(22) Anmeldungsdatum: 06.09.1991

(24) Patent erteilt: 29.04.1994

(45) Patentschrift veröffentlicht: 29.04.1994

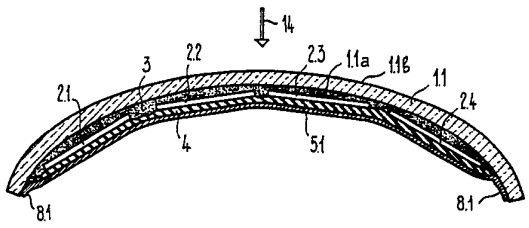
(73) Inhaber:
Glas Trösch AG, Bützberg

(72) Erfinder:
Hägler, Erich, Aeschi SO

(74) Vertreter:
Dr. R. Keller & Partner, Bern

(54) Verfahren zum Herstellen eines photovoltaischen Solarmoduls.

(57) Bei einem Verfahren zum Herstellen eines photovoltaischen Solarmoduls werden Halbleiterzellen (2.1 bis 2.4) zwischen einer lichtdurchlässigen Frontscheibe (1.1) und einer rückseitigen Abdeckung (5.1) fixiert. Die Halbleiterzellen (2.1 bis 2.4) sind scheibenförmige, flache, kristalline, photovoltaische Elemente. Zum Fixieren der mindestens einen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) zwischen Frontscheibe (1.1) und Abdeckung (5.1) wird eine pastenartige, zähflüssige Klebemasse zumindest teilweise in Form eines einzelnen Tropfens eines bestimmten Volumens zwischen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) und Frontscheibe (1.1) eingebracht. Vor dem Verfestigen wird der Tropfen durch angemessenen Druck auf die Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) zwischen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) und Frontscheibe (1.1) lufteinschlussfrei zerquetscht.



Beschreibung

Technisches Gebiet

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zum Herstellen eines photovoltaischen Solarmoduls, bei welchem mindestens eine scheibenförmige, flache, kristalline photovoltaische Halbleiterzelle zwischen einer lichtdurchlässigen Frontscheibe und einer rückseitigen Abdeckung angeordnet wird.

Die Erfindung betrifft im übrigen auch eine Vorrichtung zur Durchführung dieses Verfahrens und ein Solarmodul, vorzugsweise hergestellt nach diesem Verfahren.

Stand der Technik

Aus der EP-O 421 248-A2 ist ein Verfahren der eingangs genannten Art bekannt. Dabei werden zwischen zwei Glasplatten Solarzellen mittels eines härtbaren, optisch volltransparenten Harzes eingegossen. Vor dem Vergiessen werden die Solarzellen auf der Rückseite mit einem Abstandshalter auf der rückseitigen Glasscheibe befestigt. Mit diesem bekannten Verfahren sollen offenbar die beim Laminieren vorhandenen Probleme beseitigt werden, die beim Herstellen grossflächiger Solarmodule auftreten. Beim bekannten Laminieren werden nämlich die kristallinen Halbleiterzellen zwischen zwei Folien gebracht und so bei erhöhter Temperatur und unter geeignetem Druck auf die Frontglasscheibe aufgepresst. Das Problem dieses Prozesses liegt nun darin, dass einerseits bei zu geringem Druck Lufteinschlüsse entstehen können und andererseits bei zu grossem Druck die Halbleiterzellen brechen können.

Die Technik der Solarzellenproduktion ist mittlerweile so gut entwickelt, dass sich solche kristalline Zellen mit Durchmessern bis zu etwa 10 cm und Scheibendicken von 0.8 mm und weniger in grossen Serien herstellen lassen. Damit wird es möglich, verhältnismässig kostengünstig Solarmodule herzustellen. Vermehrt sollen nun auch Solarmodule hergestellt werden, die nicht nur in energetischer und kostenmässiger Hinsicht, sondern auch in ästhetischer Hinsicht befriedigen. Beispielsweise besteht der Wunsch, Module mit gekrümmter Oberfläche herzustellen. Solche Module lassen sich aber mit kristallinen Halbleiterscheiben nicht ohne weiteres realisieren. Die Halbleiterscheiben sind nämlich plan und unflexibel und spröde.

Um das Problem der Unflexibilität resp. der Bruchgefahr zu umgehen, sind deshalb amorphe, dünne Halbleiterschichten auf gekrümmte Scheiben abgeschieden worden. Der Vorteil der mechanischen Flexibilität muss aber durch den niedrigeren Wirkungsgrad solcher Schichten erkauft werden.

Darstellung der Erfindung

Aufgabe der Erfindung ist es nun, ein Verfahren zur Herstellung eines photovoltaischen Solarmoduls der eingangs genannten Art anzugeben, mit welchem auch gekrümmte Module gefertigt werden können. Das Verfahren selbst soll einfach und kostengünstig sein und zu Modulen mit hohem Wirkungsgrad und langer Lebzeit führen.

Gemäss der Erfindung besteht die Lösung dieser Aufgabe darin, dass zum Fixieren der mindestens einen Halbleiterzelle eine pastenartige, zähflüssige Klebemasse zwischen Halbleiterzelle und Frontscheibe resp. zwischen Halbleiterzelle und Abdekkung eingebracht wird, und dass vor dem Verfestigen der Klebemasse diese beginnend bei einem ersten Benetzungspunkt sukzessive lufteinschlussfrei durch angemessenen Druck auf die Halbleiterzelle verdrängt wird.

Gemäss der Erfindung spielen also die Viskosität der Klebemasse und die Art und Weise des Einlegens der Halbleiterzelle eine zentrale Rolle. Es ist z.B. möglich, die Klebemasse verhältnismässig gleichmässig aufzutragen und die Halbleiterzelle an der Kante unter einem Winkel anzulegen und dann sukzessive in die Masse hineinzuklappen (scherenartiges Einlegen).

Vorzugsweise wird die Klebemasse mit unregelmässiger Dicke eingebracht, wobei zwischen Halbleiterzelle und Frontscheibe resp. Abdeckung eine erhöhte Dicke vorgesehen wird. Zwischen den einzelnen Halbleiterzellen wird nur wenig oder keine Klebemasse aufgebracht.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Klebemasse zumindest teilweise in Form einzelner Tropfen eines jeweils bestimmten Volumens eingebracht wird und dann der Tropfen zwischen Halbleiterzelle und Frontscheibe resp. Abdeckung lufteinschlussfrei zerquetscht wird.

Für jede Zelle wird also ein wohldosierter Tropfen verwendet. Bevor dieser Tropfen zerfliessen kann, wird die Halbleiterzelle in ihn eingedrückt. Die Klebemasse, die zunächst verhältnismässig zentral bzgl. der Zelle eingebracht worden ist, beginnt unter diesem sanften Druck allseitig nach aussen zu fliessen. Die Luft wird sukzessive nach aussen verdrängt, Lufteinschlüsse können damit nicht auftreten. Wenn der Tropfen in der gewünschten Weise zerquetscht worden ist und der Druck von der Halbleiterzelle weggenommen wird, dann ist die Zelle in der gewünschten Art frei von mechanischen Eigenspannungen. Würden nämlich solche Eigenspannungen bestehen, dann könnten sie durch die zähflüssige Klebemasse abgeglichen werden.

Das erfindungsgemässe Verfahren führt also zu einem sandwichartigen Aufbau. Die Halbleiterzellen sind dabei zwischen Frontscheibe und rückseitiger Abdeckung luftdicht eingeschlossen. Die Klebemasse bildet dabei zumindest einen Teil der einbettenden Masse. Die Klebemasse nimmt damit sowohl eine Fixierungs- als auch eine Einbettungs- resp. Versiegelungsfunktion wahr.

Produktionstechnisch lässt sich die Erfindung im Prinzip auf mindestens zwei verschiedene Arten implementieren. Im einen Fall handelt es sich um eine reine Klebetechnik und im anderen um eine kombinierte Klebe-Giess-Technik.

Bei der reinen Klebetechnik wird der Tropfen zwischen die Frontscheibe und die Halbleiterzelle eingebracht. Als Klebemasse wird dabei ein im verfestigten Zustand volltransparentes Material verwendet.

Die Menge ist vorzugsweise gerade so bemessen, dass beim Eindrücken der Halbleiterzelle in eine vorbestimmte Position die Klebemasse allseits unter der Zelle hervorquillt. Insbesondere kann es vorteilhaft sein, das Tropfenvolumen so exakt zu bemessen, dass die Menge gerade ausreicht, um die Vorderseite der Halbleiterzelle ganzflächig an die Frontscheibe zu kleben. Auf diese Weise kann Klebemasse ohne Qualitätsverlust beim Modul eingespart werden. Zwischen den einzelnen Halbleiterzellen wird nämlich im Prinzip keine hochwertige Klebemasse benötigt. Ebenso ist auf der Rückseite der Halbleiterzellen keine transparente Schicht, sondern nur ein Kleber zum Befestigen der Abdeckung erforderlich.

Vorzugsweise wird als Klebemasse ein dickflüssiges, polymerisierendes Silikon verwendet. Dieses zeichnet sich aus durch eine hohe UV-Beständigkeit, eine gute Adhäsion bzgl. Glas und Halbleitermaterial. Im übrigen vergilbt es sozusagen nicht.

Um das Solarmodul rückseitig zu versiegeln, kann als Abdeckung eine dampfsperrende Schicht oder Folie aufgebracht werden. Wenn also auf der Rückseite nicht ebenfalls eine Glasscheibe verwendet wird, dann wird das Solarmodul natürlich leichter, was insbesondere bei der Verwendung im Fahrzeugbau von Vorteil ist. Bei Bauten (structural glazing) spielt dagegen das Gewicht weniger eine Rolle. Insbesondere zur Herstellung von teiltransparenten Solarmodulen ist die Abdeckung als Glas- oder Kunststoffscheibe ausgebildet.

Bei der kombinierten Klebe-Giess-Technik wird eine als Abdeckung dienende Folie auf einem Formteil mittels Vakuum festgehalten, dann genau ein Tropfen zwischen Folie und jeder Halbleiterzelle eingebracht und jeder Tropfen durch sanften Druck auf die Halbleiterzelle zerquetscht. Als nächstes wird die Frontscheibe am Rand mit der Folie dampfdicht verklebt. Der freie Zwischenraum zwischen Folie und Frontscheibe wird mit einem volltransparenten Material ausgegossen. Nach dem Aushärten des Materials wird das Formteil entfernt.

Auf diese Weise ist es also möglich, unter Verwendung der Giesstechnik ein Solarmodul herzustellen, das nur einseitig durch eine formfeste Scheibe begrenzt ist. Wie beim reinen Klebeverfahren ist auch hier die rückseitige Abdeckung nur eine dünne, vorzugsweise dampfsperrende Folie.

Zum Ausgiessen wird mit Vorteil ein hochflüssiges Silikon verwendet. Es können aber durchaus auch bekannte Giessharze oder Polyuretan zur Anwendung kommen.

Zum Fixieren der Halbleiterzellen kann mit Vorteil auch ein hot melt (Butylidenkautschuk) verwendet werden. Es handelt sich dabei bekanntlich um ein dauerplastisches Material, dessen Viskosität durch Wahl der Verarbeitungstemperatur beinahe beliebig festgelegt werden kann.

Die im folgenden aufgeführten Merkmale können bei beiden Ausführungsformen mit entsprechenden Vorteilen angewendet werden.

Herstellungsmässig ist es besonders effizient, wenn auf der Frontscheibe resp. der Abdeckung gleichzeitig mehrere Tropfen in einem bestimmten Abstand nebeneinander aufgebracht und danach entsprechend viele Halbleiterzellen gleichzeitig in diese Tropfen sanft eingedrückt werden. Auf diese Weise können bei einem grossen Solarmodul die vorzugsweise matrixförmig angeordneten Halbleiterzellen gleich reihenweise aufgebracht werden.

Als dampfsperrende Abdeckung eignet sich vorzugsweise eine Metallfolie, insbesondere eine Aluminiumfolie. Über die Metallfolie kann zudem auch gut die im Solarmodul entstehende Wärme abgeleitet werden.

Wenn als Frontscheibe eine vorgeformte, geeignet gekrümmte Glasscheibe verwendet wird, dann ergeben sich die besonders bevorzugten gekrümmten Solarmodule. Bei der kombinierten Klebe-Giess-Technik ist dann das Formteil in geeigneter Weise an die Krümmung der Frontscheibe angepasst.

Ein gemäss dem Verfahren hergestelltes photovoltaisches Solarmodul zeichnet sich dadurch aus, dass die Frontscheibe gekrümmt ist und dass die mindestens eine kristalline photovoltaische Halbleiterzelle mit einer volltransparenten Klebemasse mit ihrer Vorderseite ganzflächig an die Frontscheibe geklebt ist, wobei die Halbleiterzelle frei von mechanischen Eigenspannungen im Solarmodul eingeschlossen und nicht an die Krümmung der Frontscheibe angepasst ist.

Ein Solarmodul mit matrixförmig angeordneten Halbleiterzellen sieht von hinten also wie ein Ausschnitt einer polyedrischen Fläche aus. Die einzelnen ebenen Teilflächen des polyedrischen Ausschnitts werden dabei durch die (abgedeckten) Rückseiten der Halbleiterzellen gebildet.

Mit dem erfindungsgemässen Verfahren können insbesondere Solarmodule hergestellt werden, deren Frontscheibe eine Krümmung hat, die stärker als die maximal zulässige Durchbiegung der Halbleiterzelle ist. Insbesondere hat die Frontscheibe einen Krümmungsradius, der kleiner als 20 m ist. Mit der Erfindung lassen sich ohne weiteres Krümmungsradien von wenigen Metern (z.B. 1–5 m) realisieren. Die Krümmung kann ein- oder zweidimensional sein. Im eindimensionalen Fall handelt es sich um eine abwickelbare (z.B. zylindrische) und im zweidimensionalen um eine nicht abwickelbare (z.B. sphärische) Fläche.

Gemäss einer bevorzugten Ausführungsform ist die volltransparente Klebemasse nur zwischen Halbleiterzelle und Frontscheibe vorhanden. Die Rückseite der Halbleiterzellen ist vorzugsweise ganzflächig mit einem anderen Material luftdicht versiegelt. Da im Hinblick auf die Langlebigkeit des Moduls die transparente Klebemasse hohe Anforderungen erfüllen muss, ist es von Vorteil, wenn dieses nicht noch zusätzlich eine Abdichtungsfunktion wahrnehmen muss.

Die Abdeckung kann eine aufgespritzte Schicht resp. Schichtfolge oder eine Folie sein. Wenn als volltransparente Klebemasse ein im verfestigten Zustand elastisches Material, vorzugsweise ein Silikon, verwendet wird, dann können geringfügige Deformationen der Frontscheibe durch die Elastizität der Klebemasse aufgefangen werden. Auf diese Weise kann die Bruchgefahr der Halbleiterzellen beträchtlich reduziert werden. Je nach Anwendung kann es aber auch vorteilhaft sein, ein im verfe-

stigten Zustand sehr hartes Material als Klebemasse einzusetzen. Die Klebemasse hat dann einen versteifenden Einfluss auf die Frontscheibe. Die in Reaktion auf vorgegebene Kräfte resultierenden Deformationen sind dann viel kleiner als im unversteiften Zustand der Scheibe. Das Solarmodul wird also insgesamt robuster gegenüber Krafteinwirkungen.

Typischerweise sind die Halbleiterzellen Siliziumscheiben mit einem Durchmesser von mindestens 5 cm und einer Dicke von höchstens 0.8 mm, insbesondere höchstens 0.4 mm (z.B. 0.2 mm oder mehr). Je grösser natürlich die Zellen sind, desto geringer ist der Aufwand zum Herstellen eines Solarmoduls mit einer bestimmten Fläche. Je dünner die Zellen sind, umso effizienter sind sie auch. Entsprechend ist aber auch die Bruchgefahr grösser. Da aber sowohl beim erfindungsgemässen Verfahren als auch im gefertigten Solarmodul selbst im wesentlichen keine Eigenspannungen in der einzelnen Zelle induziert werden, kann mit der Erfindung dem angestrebten Trend zu dünneren Halbleiterscheiben gefolgt werden.

Mit dem erfindungsgemässen Verfahren können im Prinzip beliebig grosse Solarmodule hergestellt werden. Anders als bei der Laminartechnik werden nämlich keine flächenhaften Druck- und Temperaturverteilungen benötigt.

Typischerweise sind mehrere, im wesentlichen rechteckige Halbleiterzellen in regelmässiger, matrixartiger Anordnung zwischen Frontscheibe und Abdeckung vorgesehen.

Soll die Energieausbeute möglichst gross sein, dann werden die Halbleiterzellen möglichst nahe nebeneinander angeordnet. Im Sinn einer Teiltransparenz des Solarmoduls können natürlich auch ganz bestimmte Abstände realisiert werden (structural glazing).

Eine Vorrichtung, um in effizienter Art und Weise grossflächige Solarmodule herstellen zu können, weist einen Spritzbalken mit einer bestimmten Anzahl von mindestens zwei Düsen zum gleichzeitigen Aufbringen einer entsprechenden Anzahl von beabstandeten Tropfen der Klebemasse auf die Frontscheibe resp. die Abdeckung auf und einen Halterungsbalken mit einer entsprechenden Anzahl von Halbleiterzellenhalterungen. Letzterer ist so ausgebildet, dass auf die aufgebrachten Tropfen eine entsprechende Anzahl von Halbleiterzellen gleichzeitig aufgedrückt werden kann. Auf diese Weise können insbesondere matrixartig angeordnete Halbleiterzellen schnell und präzise aufgeklebt werden. Die Vorrichtung eignet sich sowohl für das reine Klebeverfahren als auch für das kombinierte Klebe-Giess-Verfahren.

Aus der nachfolgenden Beschreibung und der Gesamtheit der Patentansprüche ergeben sich weitere bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Nachfolgend soll die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen und im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Es zeigen:

Fig. 1: Eine perspektivische Darstellung eines Solarmoduls mit gekrümmter Frontscheibe;

Fig. 2: Eine schematische Darstellung eines Schnitts durch ein erfindungsgemässes Solarmodul;

Fig. 3a–e: Eine schematische Darstellung der einzelnen Schritte zur Herstellung des Solarmoduls gemäss Fig. 2;

Fig. 4: ein Solarmodul, hergestellt nach der Klebe-Giess-Technik; und

Fig. 5a–d: Eine schematische Darstellung der wesentlichen Schritte beim Klebe-Giess-Verfahren.

In den Figuren sind grundsätzlich gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

Wege zur Ausführung der Erfindung

Fig. 1 zeigt ein Solarmodul mit einer zweidimensional gekrümmten Frontscheibe 1.1. Ein solches Modul könnte beispielsweise als Solarzellen-bestücktes Autodach verwendet werden. Die Krümmung der Frontscheibe 1.1 würde dann der beabsichtigten Form des Autodachs entsprechen.

Unter der Frontscheibe 1.1, die z.B. aus einem hochwertigen Glas besteht, sind matrixförmig Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 angeordnet. Das unter der Einfallsrichtung 14 (in Fig. 1 von oben) auftreffende Licht wird durch die genannten Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 auf photovoltaischer Basis in Strom umgewandelt. Die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 sind in geeigneter und an sich bekannter Weise untereinander verdrahtet und z.B. mit einer Batterie oder einem Elektromotor verbunden.

Die einzelnen Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 sind im wesentlichen quadratisch. Monolytische (einkristalline) Halbleiterzellen haben vorzugsweise einen Durchmesser von ca. 12.5 cm. Die Ecken solcher Halbleiterzellen sind abgerundet, so dass eine Seitenlänge von ca. 10 cm vorliegt. Polykristalline Halbleiterzellen sind typischerweise vollständig quadratisch und haben eine Seitenlänge von z.B. 11.5 cm. Im Prinzip ist es das Ziel, möglichst grossflächige Halbleiterzellen zu verwenden. Selbstverständlich kann aber die Erfindung auch bei kleineren Durchmessern von wenigen cm (z.B. 5 cm) mit Erfolg angewendet werden. Je grösser natürlich die Zellen sind, desto geringer ist der Arbeitsaufwand zur Herstellung eines Solarmoduls einer gegebenen Fläche.

Wenn eine gute Ausnützung der einfallenden Strahlung gewünscht wird, dann sind die einzelnen Zellen möglichst nahe (z.B. wenige mm beabstandet) aneinandergefügt. Bei teiltransparenten Solarmodulen haben die Zellen einen Abstand von z.B. mehreren cm.

Fig. 2 zeigt nun schematisch einen Schnitt durch das gekrümmte Solarmodul gemäss Fig. 1. Zuoberst ist die gekrümmte Frontscheibe 1.1. Sie weist eine konkave innenseitige Oberfläche 1.1a und eine konvexe aussenseitige Oberfläche 1.1b auf. Der Krümmungsradius kann entsprechend den Bedürfnissen beliebig variieren. Die Scheibe kann selbstverständlich auch flache Partien haben oder insgesamt flach sein. Als flach ist eine Scheibe dann zu bezeichnen, wenn das Solarmodul statt mit

dem erfindungsgemässen Verfahren auch entsprechend der bekannten Laminationstechnik im Autoklaven hergestellt werden könnte. Dies ist aber auf jeden Fall bei Krümmungsradien von 20 m und weniger nicht mehr der Fall. Die Frontscheibe 1.1 soll nun eine solche ausgeprägte Krümmung aufweisen.

Auf der konkaven Seite der vollständig lichtdurchlässigen Glasscheibe sind die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 angeordnet. Ihre lichtempfindliche Seite ist der konkaven Oberfläche 1.1a zugewandt. Sie sind luftdicht zwischen der Frontscheibe und einer Abdeckung, die z.B. durch eine Metallfolie 5.1 gebildet ist, eingebettet. Ein wichtiger Aspekt dieser luftdichten Versiegelung ist der Schutz vor Korrosion (z.B. durch eindringenden Wasserdampf).

Zwischen der Frontscheibe 1.1 und den Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 befindet sich eine (verfestigte) Klebemasse 3, die optisch volltransparent ist. Damit der Wirkungsgrad des Solarmoduls auch über längere Zeit hinweg nicht zusammenfällt, müssen die optischen Eigenschaften (Lichtdurchlässigkeit) auch gegenüber dem üblicherweise auftretenden UV-Licht resistent sein. Ist dies nicht der Fall, kann mit der Zeit eine mehr oder weniger starke Vergilbung eintreten.

Es versteht sich, dass das Halbleitermaterial (z.B. Silizium) nicht chemisch reagieren darf mit der Klebemasse. Andernfalls kann die Zelle zerstört werden. Gemäss einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist die Klebemasse ein hochtransparentes, zumindest leicht elastisches Silikon. Dieses hat nicht nur die oben geforderten Eigenschaften, sondern auch eine gute Adhäsion sowohl auf Glas als auch auf der Oberfläche der Halbleiterzelle (Silizium-Dioxyd). Des weiteren ist Silikon auch vom Brechungsindex her gut an die Scheibe angepasst, so dass die Reflexionsverluste gering sind. Schliesslich hält eine solche Klebemasse die bis zu 60°C über der Umgebungstemperatur liegenden Innentemperaturen des Solarmoduls aus. Silikon überlebt sogar auch sog. hot spots, die bei Ausfall eines Halbleiterelements entstehen und ohne weiteres zu Überhitzungen von 160°C führen können.

Die Klebemasse 3 füllt zumindest den Bereich zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche der Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 und der Frontscheibe 1.1 aus. Die hintere Seite der Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 ist mit einer Isolationsschicht 4 abgedeckt. Diese kann im Prinzip sehr dünn sein und bildet einfach die elektrische Isolation gegenüber der als Abdeckung vorzugsweise verwendeten Metallfolie 5.1. Die Isolationsschicht 4 kann durchaus aus einem kostengünstigen Material bestehen. Da sie ja auf der Rückseite der Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 vorgesehen ist, braucht sie nicht transparent zu sein. Sie kann natürlich auch aus dem gleichen Silikon wie die Klebemasse 3 bestehen.

Die Metallfolie 5.1, die vorzugsweise eine Aluminiumfolie ist, ist im Randbereich 8.1 des Moduls auf die Frontscheibe 1.1 heruntergeklebt. Am besten eignet sich dazu ein dampfdichter Kleber aus Kunstharz.

Die Metallfolie 5.1 ist nicht nur eine gute Dampfbarriere, sondern leitet auch die im Modul entstehende Wärme nach aussen ab. Je dünner natürlich die Isolationsschicht 4, desto besser die Möglichkeit, die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 zu kühlen.

Auf dem in Fig. 2 dargestellten Schnitt ist deutlich zu erkennen, dass die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 nicht an die gekrümmte Frontscheibe 1.1 angeformt sind. Vielmehr überbrücken sie die gekrümmte Oberfläche 1.1a sehnenförmig. Der Abstand zwischen der lichtempfindlichen Oberfläche der Halbleiterzelle (z.B. 2.1) und der Oberfläche 1.1a der Frontscheibe 1.1 ist damit am Rand der Halbleiterzelle 2.1 geringer als in ihrem Zentrum. Aufgrund der planaren Halbleiterzellen sieht die Abdeckung auf der Hinterseite im Schnitt im Prinzip polygonal aus.

Anhand der Fig. 3a bis 3e soll nun erläutert werden, wie dieses ästhetisch befriedigende Solarmodul gefertigt werden kann. Es wird ausgegangen von einer geeignet vorgeformten Frontscheibe 1.1. (Das Formen von z.B. Glasscheiben ist im Stand der Technik bekannt und nicht Gegenstand der Erfindung.) Auf der konkav gekrümmten Oberfläche 1.1a werden nun einzelne Tropfen 9.1 bis 9.4 der Klebemasse aufgebracht. Dies kann z.B. mit Hilfe eines mit Düsen versehenen Spritzbalkens geschehen, wobei die einzelnen Tropfen im Volumen wohldosiert sind und einen definierten gegenseitigen Abstand haben. Der Abstand ist entsprechend der beabsichtigten Anordnung der Halbleiterzellen gewählt. Vorzugsweise befinden sie sich dort, wo das Zentrum der jeweiligen Zelle zu liegen kommen soll (Fig. 3a).

Die Klebemasse ist pastenartig resp. zähflüssig. Die Tropfen 9.1 bis 9.4 zerfliessen also nur sehr langsam. Aus dem gleichen Grund fliessen die Tropfen, die auf leicht geneigte Bereiche (z.B. 9.1 und 9.4) gesetzt worden sind, nicht sofort in flachere Bereiche (z.B. gegen die Mitte).

Als nächstes werden nun die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 über den Tropfen 9.1 bis 9.4 positioniert (Fig. 3b). Dies geschieht z.B. mit einem Halterungsbalken, der ebensoviele Halbleiterzellenhalter aufweist, wie zuvor Tropfen gesetzt worden sind. Die einzelnen Halbleiterzellen werden in den Halterungen z.B. mittels Unterdruck festgehalten. Damit die Zellen beim nachfolgenden Eindrücken nicht zerbrechen können, sollte die Halbleiterzelle mit der Rückseite ganzflächig auf einer geeigneten Stützfläche der Zellenhalterung aufliegen.

Nun werden die einzelnen Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 gleichzeitig auf die entsprechenden Tropfen 9.1 bis 9.4 gedrückt (siehe Pfeile). Unter diesem Druck wird der zähflüssige Tropfen (z.B. 9.1) zwischen der Halbleiterzelle 2.1 und der Frontscheibe 1.1 zerquetscht. Die Klebemasse fliesst daher von der Mitte her (die Halbleiterzelle 2.1 wurde möglichst zentral auf dem Tropfen 9.1 aufgesetzt) allseitig nach aussen. Aufgrund der Viskosität und der Oberflächenspannung der Klebemasse wird die Luft sukzessive seitlich nach aussen gedrängt, so dass keine Lufteinschlüsse (Lunker) entstehen können.

Die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 werden in eine jeweils genau definierte Position gedrückt. Diese Position kann z.B. durch einen minimalen Abstand des Zellenrandes von der Frontscheibe vorgegeben sein (z.B. knapp berührend).

Beim Zerquetschen der Tropfen 9.1 bis 9.4 ist der auf die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 ausgeübte Druck entsprechend der Ausgestaltung der Halbleiterzellenhalter sowie der Belastbarkeit der Halbleiterzellen zu bemessen. Im Hinblick auf eine hohe Arbeitsgeschwindigkeit ist natürlich ein impulsartiger Druckverlauf mit hoher Impulsspitze erwünscht. Damit aber die Halbleiterscheibe keinen Schaden nimmt, ist der Druckverlauf resp. das Druckmaximum zu beschränken. Ein Halbleiterzellenhalter, der eine flächenhafte Stützung der Halbleiterzelle gewährleistet, lässt einen höheren Einpressdruck zu als eine weitmaschige, gitterartige Stützung. Da die Halbleiterzelle also mechanisch möglichst nicht belastet (durch Bogen) werden soll, kann der Einpressdruck als sanft bezeichnet werden.

Vorzugsweise ist das Volumen des Tropfens so bemessen, dass die Klebemasse 3 gerade leicht seitlich unter der Halbleiterzelle 2.1 hervorquillt, nachdem sie in die vorbestimmte Position gedrückt worden ist. Wenn die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 genügend nahe nebeneinander angeordnet sind, dann entsteht auf diese Weise eine zusammenhängende Klebeschicht 3 (Fig. 3c). Bei grösseren Abständen können entweder grössere Tropfen gesetzt werden, wobei dann die seitlich unter den Halbleiterzellen übermässig hervorquellende Klebemasse verteilt werden muss, oder der zwischen den Zellen freiliegende Bereich der Oberfläche 1.1a wird mit einer anderen Schicht abgedeckt.

Das Aufbringen der Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 muss verhältnismässig rasch geschehen, damit die Tropfen nicht selbständig zerfliessen können. Sobald die Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 in der gewünschten Position sind, darf die Polymerisation der Klebemasse einsetzen. Auf diese Weise wird Reihe um Reihe einer matrixförmigen Zellenanordnung aufgebracht.

Als nächstes wird die Isolationsschicht 4 aufgebracht (Fig. 3d). Es kann sich dabei um eine aufgestrichene, aufgegossene, aufgerakelte oder aufgespritzte Kunststoffschicht handeln. Während sich beim Aufspritzen eher dünne Schichten ergeben, lassen sich durch Aufgiessen oder Aufrakeln sehr schnell dicke Schichten von z.B. 1 mm oder auch mehr auftragen. Die Isolationsschicht 4 kann wahlweise nach dem Aufbringen einer einzelnen Reihe von Halbleiterzellen, oder erst nachdem die ganze Frontscheibe bestückt ist, appliziert werden.

Schliesslich wird als Abdeckung vorzugweise eine Metallfolie 5.1 aufgebracht. Sie wird rahmenartig auf die mit Halbleiterzellen 2.1 bis 2.4 bestückte Oberfläche der Frontscheibe 1.1 luftdicht auf die Scheibe selbst aufgeklebt. Es ist natürlich dafür zu sorgen, dass unterhalb der Abdeckung keine Luftblasen vorhanden sind.

Damit ist das photovoltaische Solarmodul fertig.

Der Einfachheit halber wurde auf das Verdrahten der Halbleiterzellen nicht eingegangen. Dies kann in an sich bekannter Weise gemacht werden, da durch die Erfindung bei dieser Technologie keine erfinderischen Änderungen erforderlich sind. Im Zusammenhang mit dem Verdrahten ergibt sich durch die Erfindung der Vorteil, dass die Halbleiterzellen durch die Klebemasse fixiert sind und nicht durch separate Lehren gehalten werden müssen.

Als nächstes wird nun noch ein Ausführungsbeispiel für die Klebe-Giess-Technik angegeben.

Fig. 4 zeigt ein mit diesem Verfahren hergestelltes photovoltaisches Solarmodul. Wiederum wird eine gekrümmte Frontscheibe 1.2 verwendet, auf deren konkav gekrümmten Oberfläche 1.2a die Halbleiterzellen 2.5 bis 2.8 angeordnet sind. Die einzelnen Zellen sind in einem volltransparenten Giessmaterial eingebettet (Giessharz 7). Rückseitig ist das Modul mit einer Metallfolie 5.2 versiegelt. Die Klebemasse 6.1 bis 6.4 befindet sich zwischen den Halbleiterzellen 2.5 bis 2.8 und der Metallfolie 5.2 (Abdeckung). Gemäss einer bevorzugten Ausführungsform ist die Abdeckung an die Frontscheibe formmässig angepasst. Das Solarmodul ist also im wesentlichen überall gleich dick. Im Randbereich 8.2 ist die Metallfolie 5.2 analog wie bei der ersten Ausführungsform gemäss Fig. 2 auf die Frontscheibe unmittelbar aufgeklebt.

Fig. 5a–d zeigt die einzelnen Verfahrensschritte bei der Herstellung des in Fig. 4 gezeigten Moduls. Anders als bei der reinen Klebetechnik wird hier auf der Rückseite begonnen. Es wird also zunächst eine Folie auf einem Formteil 11 ausgelegt. Dieses weist ein geeignet ausgebildetes Luftkanalsystem 12 auf, mit dem die Luft unter der Folie abgesaugt und dadurch die Folie ganzflächig festgehalten werden kann (Fig. 5a). Die Krümmung des Formteils 11 ist an die später aufzusetzende Frontscheibe 1.2 angepasst. Am Rand ist eine umlaufende Rippe 15 vorgesehen, auf der später die Frontscheibe 1.2 aufliegen kann. Die Folie ist auch über diese Rippe 15 gezogen.

Auf die so aufgespannte Folie werden nun einzelne Tropfen 10.1 bis 10.4 der Klebemasse gesetzt. Bezüglich Fliessfähigkeit und Konsistenz gilt das bereits oben über die Klebemasse Gesagte. Im Gegensatz zu oben muss aber hier kein volltransparentes, optisch hochwertiges Material verwendet werden. Die einzelnen Tropfen werden entsprechend der geometrischen Anordnung der anzubringenden Halbleiterzellen angeordnet. Das Volumen des einzelnen Tropfens muss nicht sehr gross sein, da der Tropfen primär nur eine Fixierungsfunktion wahrnehmen muss.

Als nächstes werden nun die Halbleiterzellen 2.5 bis 2.8 positioniert, und zwar werden sie mit der blinden Rückseite auf die entsprechenden Tropfen 10.1 bis 10.4 gesetzt.

Nun werden die Tropfen 10.1 bis 10.4 mittels sanftem Druck auf die Halbleiterzellen 2.5 bis 2.8 zerquetscht (vgl. Pfeile). Da das Volumen der einzelnen Tropfen relativ klein war, quillt die Klebemasse 6.1 bis 6.4 nicht seitlich unter der Halbleiterzelle 2.5 bis 2.8 hervor. Dies ist wie erwähnt ja auch nicht erforderlich. Wichtig ist nur, dass die Halbleiterzelle 2.5 durch die Klebemasse 6.1 auf der Folie fixiert wird, und dass keine Lufteinschlüsse entstehen. Letzteres ist aber aufgrund der geeignet gewählten Viskosität und Adhäsion nicht der Fall.

Nun wird auf den Rand der Folie ein Kleber (z.B. Kunstharz) aufgebracht und die Frontscheibe über

die präparierte Halbleiterzellenanordnung gelegt und am Rand durch den Kleber luftdicht mit der Folie verbunden (Fig. 5d). Es liegt nun ein ausgiessbarer Hohlraum 13 vor. Über eine geeignet ausgebildete, nicht dargestellte Zuführung wird nun ein Giessharz 7 (Fig. 4) eingefüllt. Es wird dabei nur gerade soviel Giessharz eingefüllt, wie vom fertigen Modul benötigt wird.

Durch den Druck der Flüssigkeit wird die Frontscheibe 1.2 leicht ausgebuchtet. Entsprechend ist das Volumen des Hohlraums 13 etwas grösser geworden. Das beim Einfüllen vertikal gehaltene Modul wird nun langsam in die Horizontale bewegt, wobei der Druck auf die Frontscheibe nachlässt und der Hohlraum die angestrebte Grösse wieder annimmt. Die eingefüllte Menge an Giessharz füllt dann den Hohlraum vollständig aus.

Wenn sich das Giessharz verfestigt hat, dann kann das Formteil 11 entfernt werden. Das in Fig. 4 gezeigte Solarmodul ist fertig.

Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt. Im Gegenteil ist der Anwendungsbereich der vorgeschlagenen Verfahren sehr gross. Selbstverständlich können anstelle der gekrümmten Frontscheiben auch flache verwendet werden. Es können auch Module mit konkaver statt konvexer lichtzugewandter Oberfläche gefertigt werden. Wegen ihrer Langlebigkeit sind Glasscheiben bevorzugt. Für die Frontscheiben kommen aber auch andere transparente Materialien in Frage, wie z.B. Polyester oder Polycarbonat.

Die in den Fig. 2 und 4 dargestellten Module haben als Abdeckung eine Folie. Es liegt natürlich ebenso im Rahmen der Erfindung, auch für diese Abdeckung eine formfeste Scheibe (z.B. aus Glas) zu verwenden.

Anstelle von Silikon kann auch ein volltransparentes Harz mit geeigneter Viskosität im flüssigen Zustand verwendet werden. Dadurch, dass ein solches Harz in getrocknetem Zustand eine sehr hohe Festigkeit hat, wird – wie bereits erwähnt – die Stabilität des Solarmoduls verbessert.

Die Klebemasse ist typischerweise ein Zweikomponentenkleber. Anstelle von Zweikomponentenkleber können auch UV-härtende Kleber treten. Analoges gilt für das Ausgiessmaterial bei der kombinierten Klebe-Giess-Technik.

Wenn die Abdeckung selbst ein Isolator ist und nicht wie beschrieben eine Metallfolie, dann kann auf die separate Isolationsschicht 4 im Prinzip verzichtet werden. Andererseits können aber auch zusätzliche Schichten vorgesehen werden, mit denen gezielt Korrosionsschutzmassnahmen verwirklicht werden. In diesem Sinn können z.B. auch Schichten als mechanischer Schutz gegen Punktlasten aufgebracht werden. Wenn nämlich die Klebemasse bei Fig. 2 im verfestigten Zustand sehr elastisch ist und die Rückseite des Solarmoduls nicht geschützt ist, dann können die Halbleiterzellen bei punktförmig auftretenden Belastungen brechen. Auf der Rückseite kann deshalb z.B. eine gummiartige Schicht aufgetragen sein, die punktförmig auftretende Kräfte auf einen gewissen Bereich verteilt. Wenn das Solarmodul als Dach eines Autos verwendet wird, dann kann mit einer angeformten Kunststoffeinlage die Rückseite des Moduls gegen den Personenraum abgedeckt werden.

Abschliessend kann festgestellt werden, dass durch das erfindungsgemässe Verfahren photovoltaische Solarmodule hergestellt werden können, die energetisch effizient sind und an die unterschiedlichsten ästhetischen Bedürfnisse (Formen) eingepasst werden können. Es ist auch ein Vorteil der Erfindung, dass ohne Probleme flächenmässig sehr grosse Module hergestellt werden können.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines photovoltaischen Solarmoduls, bei welchem mindestens eine scheibenförmige, flache, kristalline photovoltaische Halbleiterzelle (2.1 bis 2.8) zwischen einer lichtdurchlässigen Frontscheibe (1.1, 1.2) und einer rückseitigen Abdeckung (5.1, 5.2) angeordnet wird, dadurch gekennzeichnet, dass zum Fixieren der mindestens einen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.8) eine pastenartige, zähflüssige Klebemasse (3; 9.1 bis 9.4; 10.1 bis 10.4) zwischen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) und Frontscheibe (1.1) resp. zwischen Halbleiterzelle (2.5 bis 2.8) und Abdeckung (5.2) eingebracht wird, und dass vor dem Verfestigen der Klebemasse (3; 9.1 bis 9.4; 10.1 bis 10.4) diese beginnend bei einem ersten Benetzungspunkt sukzessive lufteinschlussfrei durch angemessenen Druck auf die Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4; 2.5 bis 2.8) verdrängt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Klebemasse (3; 9.1 bis 9.4; 10.1 bis 10.4) mit unregelmässiger Dicke eingebracht wird, wobei zwischen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4; 2.5 bis 2.8) und Frontscheibe (1.1) resp. Abdekkung (5.2) eine erhöhte Dicke vorgesehen wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Klebemasse (3; 9.1 bis 9.4; 10.1 bis 10.4) zumindest teilweise in Form einzelner Tropfen (9.1 bis 9.4; 10.1 bis 10.4) eines jeweils bestimmten Volumens eingebracht und zwischen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) und Frontscheibe (1.1) resp. Abdeckung (5.2) lufteinschlussfrei zerquetscht wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Tropfen (9.1 bis 9.4) zwischen die Frontscheibe (1.1) und die Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) eingebracht wird und dass eine im verfestigten Zustand vollständig transparente Klebemasse (3) verwendet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass das Volumen eines Tropfens (9.1 bis 9.4) mindestens so gross bemessen wird, dass beim Eindrücken der Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) in eine vorbestimmte Position allseits der Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) die Klebemasse hervorquillt.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass als Klebemasse (3) ein dickflüssiges, polymerisierendes Silikon verwendet wird.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass als Abdeckung eine dampfsperrende Schicht oder Folie (5.1, 5.2) aufgebracht wird.

8. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine als Abdeckung dienende Folie (5.2) auf einem Formteil (11) mittels Vakuum festgehalten wird, dass genau ein Tropfen (10.1 bis 10.4) zwischen Folie (5.2) und jeder Halbleiterzelle (2.5 bis 2.8) eingebracht wird, dass jeder Tropfen (10.1 bis 10.4) durch sanften Druck auf die Halbleiterzelle (2.5 bis 2.8) zerquetscht wird, dass die Frontscheibe (1.2) am Rand (8.2) mit der Folie (5.2) dampfdicht verklebt wird, dass der freie Hohlraum (13) zwischen Folie (5.2) und Frontscheibe (1.2) mit einem volltransparenten Material ausgegossen wird, und dass nach dem Aushärten des Giessmaterials das Formteil (11) entfernt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass als volltransparentes Giessmaterial (7) ein hochflüssiges Silikon verwendet wird.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass auf der Frontscheibe (1.1) resp. der Folie (5.2) gleichzeitig mehrere Tropfen (9.1 bis 9.4 resp. 10.1 bis 10.4) in einem bestimmten Abstand nebeneinander aufgebracht werden, und dass danach entsprechend viele Halbleiterzellen (2.1 bis 2.4 resp. 2.5 bis 2.8) gleichzeitig in die Tropfen (9.1 bis 9.4 resp. 10.1 bis 10.4) eingedrückt werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass als dampfsperrende Abdeckung eine Metallfolie (5.1, 5.2), insbesondere eine Aluminiumfolie, aufgebracht wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass als Frontscheibe (1.1, 1.2) eine vorgeformte, gekrümmte Glasscheibe verwendet wird.

13. Photovoltaisches Solarmodul hergestellt nach dem Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Frontscheibe (1.1) gekrümmt ist und dass die mindestens eine kristalline photovoltaische Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) mit einer volltransparenten Klebemasse (3) mit ihrer Vorderseite ganzflächig an die Frontscheibe (1.1) geklebt ist, wobei die Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) frei von mechanischen Eigenspannungen und nicht an die Krümmung der Frontscheibe (1.1) angepasst ist.

14. Solarmodul nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Krümmung der Frontscheibe (1.1, 1.2) stärker als die maximal zulässige Durchbiegung der Halbleiterzelle (2.1 bis 2.8) ist, insbesondere dass der Krümmungsradius kleiner als 20 m ist.

15. Solarmodul nach Anspruch 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, dass die volltransparente Klebemasse (3) nur zwischen Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) und Frontscheibe (1.1) vorhanden ist und dass die Rückseite der Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) mit einem anderen Material luftdicht versiegelt ist.

16. Solarmodul nach einem der Ansprüche 13 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass die rückseitige Abdeckung des Solarmoduls durch eine zusammenhängende, ganzflächige Abdeckschicht (5.1, 5.2) gebildet ist.

17. Solarmodul nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Abdeckschicht eine Metallfolie (5.1, 5.2) ist.

18. Solarmodul nach einem der Ansprüche 13 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass die volltransparente Klebemasse (3) ein in verfestigtem Zustand elastisches Material, insbesondere ein Silikon, ist.

19. Solarmodul nach einem der Ansprüche 13 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens eine Halbleiterzelle (2.1 bis 2.4) eine Siliziumscheibe mit einem Durchmesser von mindestens 5 cm und einer Dicke von höchstens 0.8 mm, insbesondere höchstens 0.4 mm, ist.

20. Solarmodul nach einem der Ansprüche 13 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere im wesentlichen rechteckige Halbleiterzellen (2.1 bis 2.4) in regelmässiger, matrixartiger Anordnung zwischen Frontscheibe (1.1) und Abdeckung (5.1) vorgesehen sind.

21. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch einen Spritzbalken mit einer bestimmten Anzahl von mindestens zwei Düsen zum gleichzeitigen Aufbringen einer entsprechenden Anzahl von beabstandeten Tropfen (9.1 bis 9.4) der Klebemasse auf die Frontscheibe (1.1) resp. die Abdeckung (5.2) und einen Halterungsbalken mit einer entsprechenden Anzahl von Halbleiterzellenhalterungen, der so ausgebildet ist, dass auf die aufgebrachten Tropfen (9.1 bis 9.4 resp. 10.1 bis 10.4) eine entsprechende Anzahl von Halbleiterzellen (2.1 bis 2.4 resp. 2.5 bis 2.8) gleichzeitig aufgedrückt werden kann.

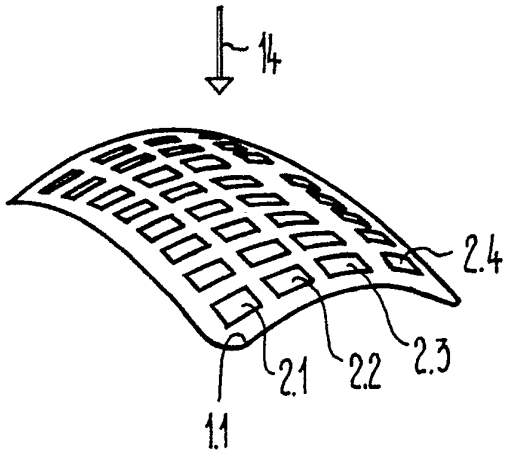


Fig.1

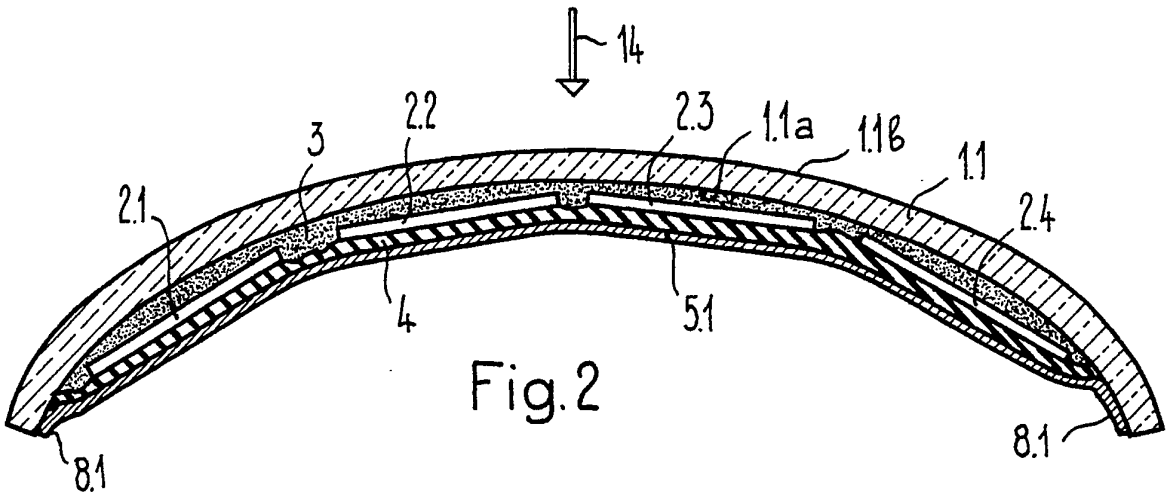


Fig.2

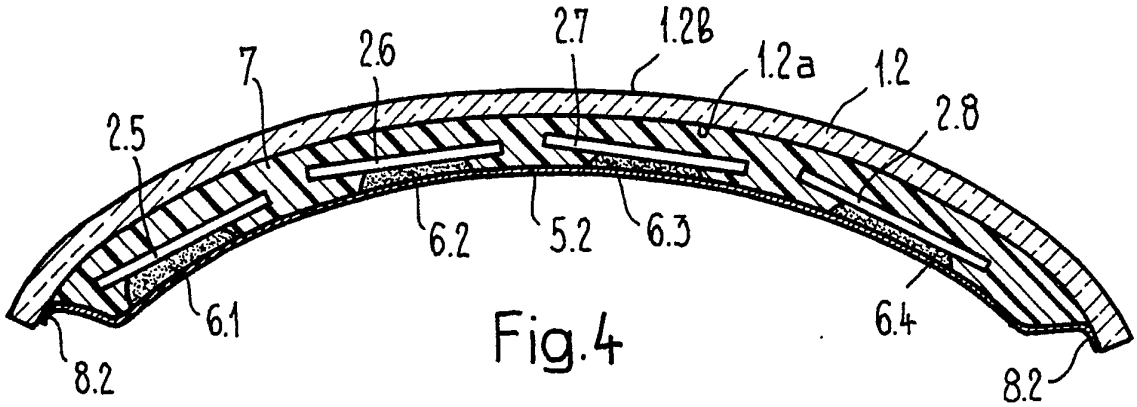


Fig.4

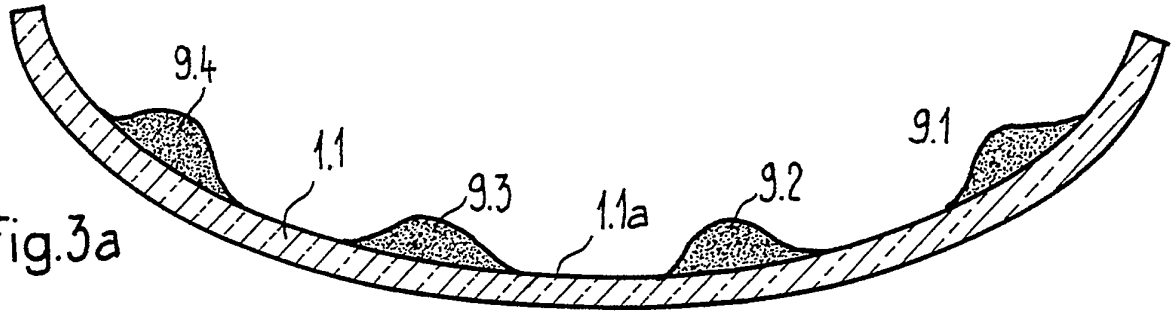


Fig.3a

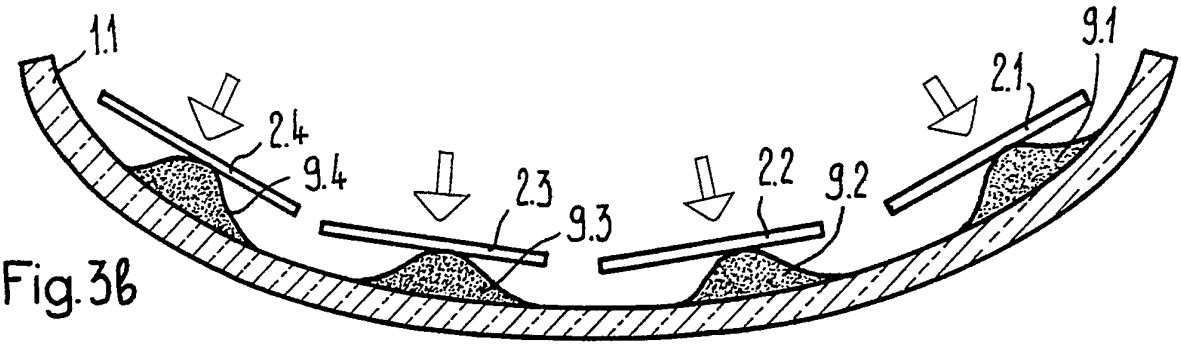


Fig.3b

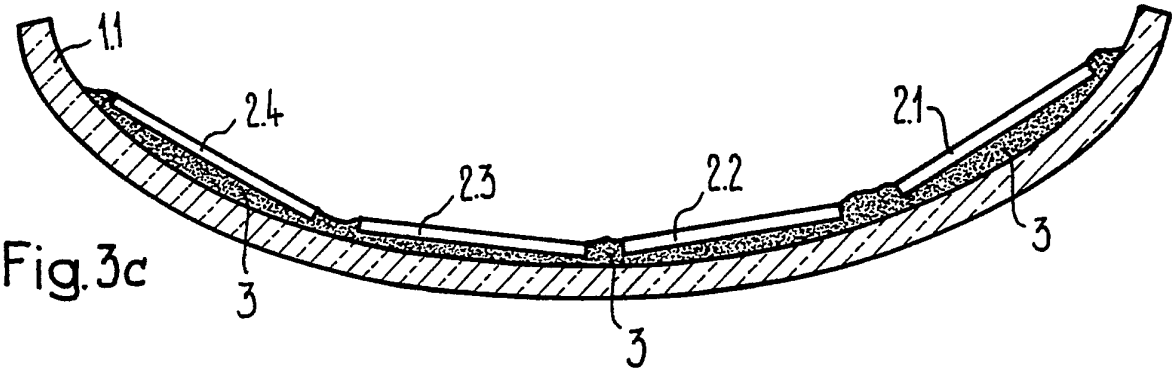


Fig.3c

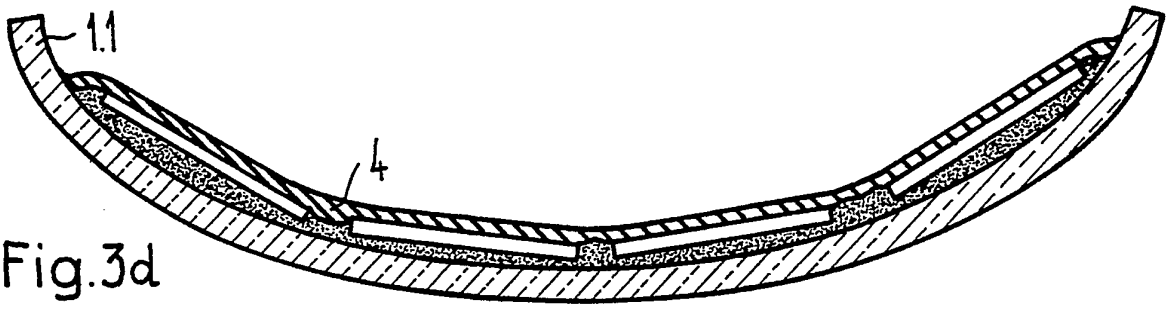


Fig.3d

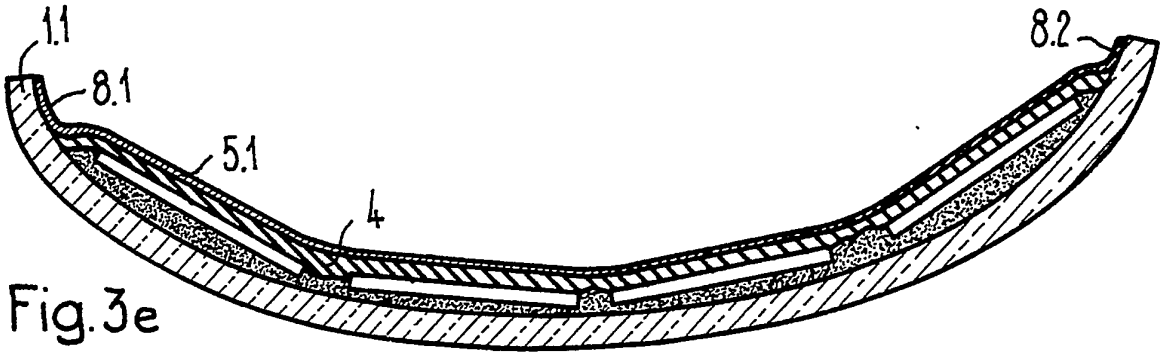


Fig.3e

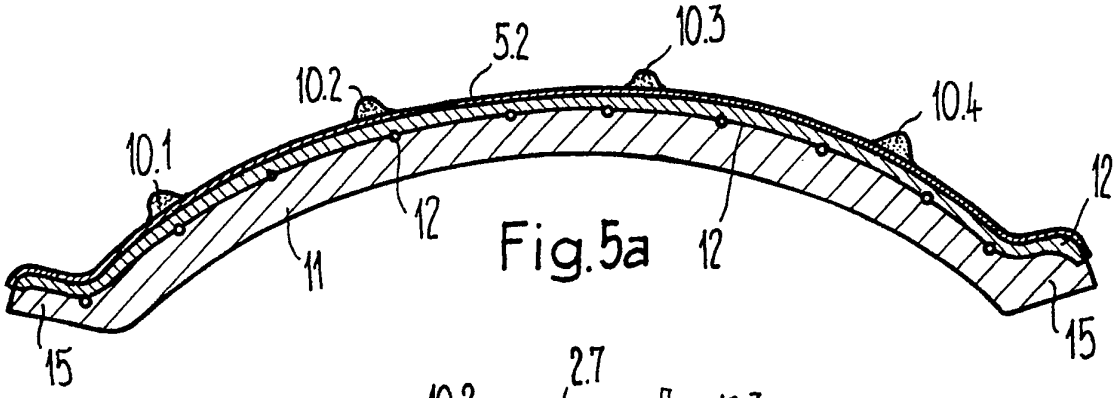


Fig.5a

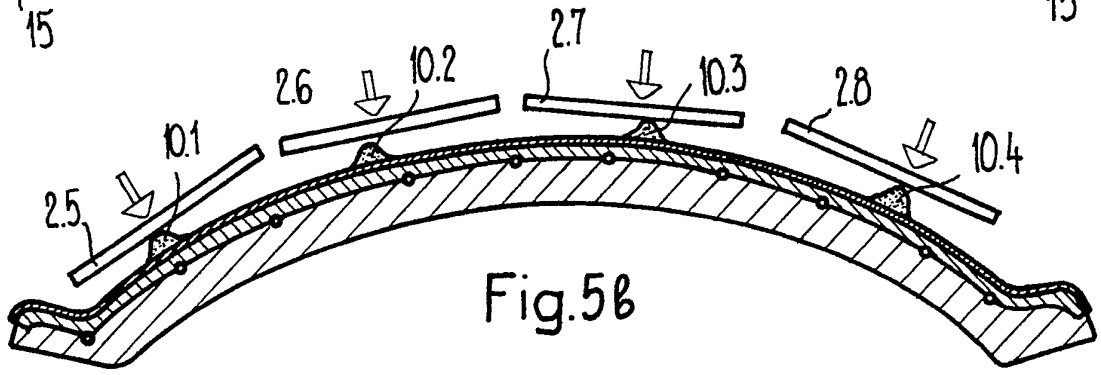


Fig.5b

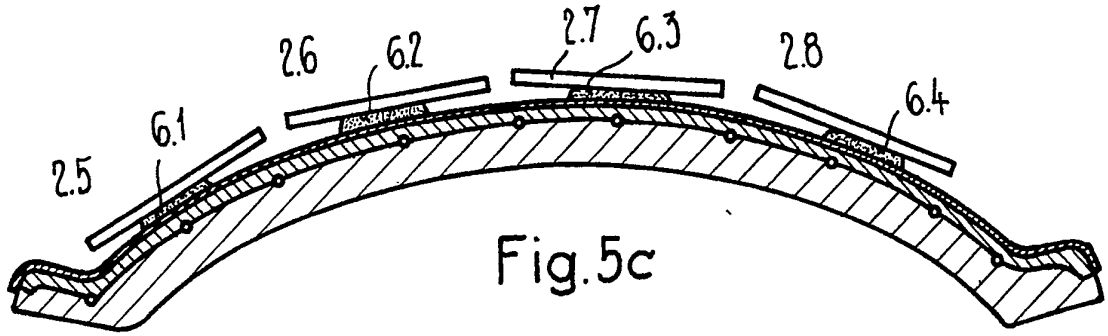


Fig.5c

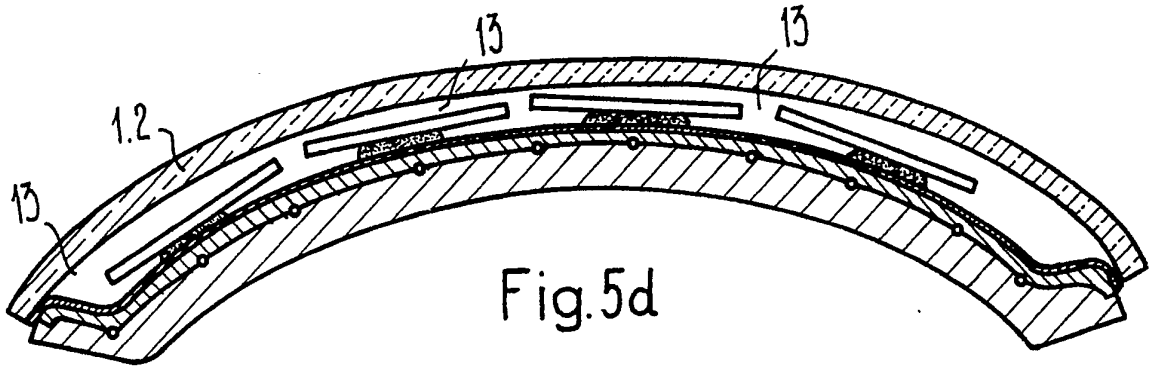


Fig.5d