

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 645 479**

21 Número de solicitud: 201630751

51 Int. Cl.:

H01L 31/046 (2014.01)

H01L 31/043 (2014.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

03.06.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

05.12.2017

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO / EUSKAL
HERRIKO UNIBERTSITATEA (90.0%)**

Barrio Sarriena, s/n

48940 LEIOA (Bizkaia) ES y

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (10.0%)

72 Inventor/es:

JIMENO CUESTA , Juan Carlos ;

GUTIÉRREZ SERRANO , Jose Rubén ;

FANO LESTÓN , Vanesa y

DEL CAÑIZO NADAL , Carlos

74 Agente/Representante:

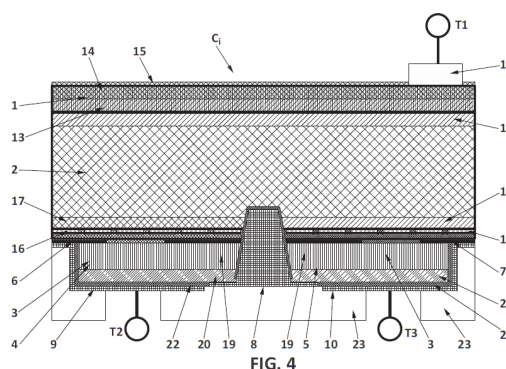
VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

54 Título: **Célula fotovoltaica, panel fotovoltaico y método de fabricación de células fotovoltaicas**

57 Resumen:

Célula fotovoltaica, panel fotovoltaico y método de fabricación de células fotovoltaicas.

Célula fotovoltaica (C_i) que comprende al menos una sub-célula de un primer semiconductor (1) y una sub-célula de un segundo semiconductor (2) conectados mediante tres electrodos (T1, T2, T3). El segundo semiconductor es típicamente silicio, mientras que el primer semiconductor es un material de con mayor banda prohibida depositado más cercano a una superficie de incidencia de radiación electromagnética. El primer electrodo (T1) se encuentra en la cara anterior de la célula fotovoltaica (C_i), mientras que el segundo electrodo (T2) y el tercer electrodo (T3) se encuentran en la cara posterior de dicha fotovoltaica (C_i). Tanto el segundo electrodo (T2) como el tercer electrodo (T3) están conectados al segundo semiconductor (2). Las regiones a ambos lados de la zona de contacto entre el primer semiconductor y el segundo semiconductor presentan un mismo tipo de portadores mayoritarios. Se consigue así una célula fotovoltaica (C_i) con una elevada eficiencia de conversión, capaz de integrarse en dispositivos de dos terminales.



DESCRIPCIÓN

Célula fotovoltaica, panel fotovoltaico y método de fabricación de células fotovoltaicas

5 **Objeto de la invención**

La presente invención se refiere al campo de la energía solar fotovoltaica, y más concretamente a una célula fotovoltaica de tipo tándem.

10 **Antecedentes de la invención**

15 Las células solares de silicio cristalino dominan actualmente el sector fotovoltaico, debido a una eficiencia de conversión razonable, buena estabilidad temporal y una tecnología de fabricación sencilla, barata, estable y respetuosa con el medio ambiente. Si bien las células fotovoltaicas de silicio más empleadas habitualmente presentan eficiencias de entre el 18% y el 19%, existen productos industriales que alcanzan valores en torno al 24%, muy próximos a los límites teóricos calculados para esta tecnología. Resulta, por lo tanto, necesario encontrar soluciones tecnológicas que permitan superar los umbrales límite de este tipo de células.

20 La principal alternativa para elevar la eficiencia de las células fotovoltaicas son las células tándem, que comprenden una pluralidad de capas (también denominadas 'sub-células' o 'niveles') realizadas con diferentes materiales semiconductores. Seleccionando materiales con diferentes anchuras de su banda prohibida (del inglés "band-gap") se consigue sensibilizar la célula a los diferentes rangos espectrales de los fotones comprendidos en la radiación solar. Así, los materiales de mayor anchura de banda prohibida absorben los fotones más energéticos, de longitud de onda corta, pero son capaces de operar a tensiones elevadas. Por el contrario, los materiales de menor anchura de banda prohibida son menos selectivos respecto de la longitud de onda de los fotones pero su tensión de operación también es menor. En todos los casos, la corriente fotogenerada u obtenida mediante la absorción de fotones es proporcional y próxima al flujo de fotones absorbido. Para maximizar la eficiencia de conversión de luz a electricidad al utilizar múltiples sub-células, es necesario dirigir los fotones más energéticos a las sub-células de mayor anchura de banda prohibida, capaces de absorberlos y de entregar corriente eléctrica a tensiones más elevadas, mientras que los fotones de menor energía se destinan a células de menor anchura de banda prohibida, capaces de absorberlos aun operando a tensiones inferiores. Puesto que los materiales de mayor anchura de banda prohibida son transparentes a los fotones menos energéticos, dichos materiales pueden enfrentarse directamente a la luz solar, para a continuación situarse tras ellos otros materiales sensibles a los fotones no absorbidos.

40 Las células tándem suelen estar asociadas en serie a nivel eléctrico, es decir, la corriente que atraviesa cada sub-célula es idéntica, siendo la tensión total la suma de las tensiones que aporta cada sub-célula. Los dispositivos resultantes son de empleo simple pues disponen de sólo dos terminales eléctricos, uno en su cara frontal, enfrentada a la luz solar y el otro en la cara opuesta, por lo general recubriendo toda la superficie posterior del dispositivo. Sin embargo, la implementación de esta configuración conlleva una notable complejidad. Consideremos un caso típico basado en tres semiconductores cuya sensibilidad al espectro solar abarca principalmente los rangos ultravioleta (UV), visible (VIS) e infrarrojo (IR), respectivamente. Las uniones entre la estructura de capas podrían implementarse siguiendo unas uniones del tipo $p_{nUV}-p_{nVIS}-p_{nIR}$. No obstante, esto implica la aparición de una unión parásita n-p entre cada capa, capaz de desarrollar una tensión opuesta a la obtenida por el dispositivo pn que se persigue. Para evitar esto, es preciso construir otro dispositivo intermedio entre cada sub-célula, del tipo $n^{++}p^{++}$ donde el índice ++ indica que se trata de un semiconductor tan dopado que se encuentra degenerado respecto de su gas mayoritario. Este dispositivo intermedio, denominado diodo túnel, permite la interconexión de las sub-células sin que aparezcan tensiones apreciables en sentido inverso a las deseadas.

55 Adicionalmente, cada capa debe permitir el paso de los fotones no absorbidos para su conversión en capas posteriores, por lo que los semiconductores deben ser escogidos cuidadosamente a fin de que sus constantes dieléctricas sean lo más similares posible. Por último, puesto que la configuración en serie implica que la corriente debe permanecer constante a lo largo de todas las capas, dicha corriente queda limitada a la corriente fotogenerada por la capa que impone su valor mínimo. Por lo tanto, es preciso seleccionar cuidadosamente tanto el material de cada capa como su espesor a fin de que una captación reducida de fotones no limite la corriente total del dispositivo, o bien una captación excesiva de éstos deje a la siguiente capa en una situación de escasez de fotones disponibles.

60 Las células tándem pueden ser de dos, tres, cuatro o más niveles, si bien a partir de cuatro niveles no parecen esperables mejoras notables en la eficiencia del dispositivo. Para el caso particular de una célula tándem de tres niveles en serie basados en semiconductores III-V de la familia del arseniuro de galio, se han llegado a obtener eficiencias del orden del 40%. No obstante, dichas implementaciones presentan un

elevado coste debido a la necesidad de usar sustratos de germanio. Dicho coste ha evitado su uso generalizado, quedando restringidos a sistemas fotovoltaicos de muy elevada concentración y a aplicaciones espaciales, en las que la eficiencia prima sobre el coste. Estos dispositivos suelen precisar casi una veintena de capas a fin de implementar las tres sub-células, los diodos túnel intermedios y otras capas de interfaz necesarias.

En el caso de células tándem en las que una de las capas visible o ultravioleta es una sub-célula de silicio cristalino, ninguna de las soluciones conocidas en el estado de la técnica ha conseguido proporcionar eficiencias superiores a las de una célula simple del mismo material. Esto se debe en primer lugar a que no es posible encontrar un material de anchura de banda prohibida pequeña capaz de alcanzar los resultados de las sub-células de silicio, limitando, por lo tanto, la intensidad obtenible por un sistema en serie. En la porción infrarroja del espectro solar no absorbible por el silicio hay fotones suficientes para sólo 26 mA/cm² de dispositivo expuesto a la luz bajo una irradiancia normalizada de 1 sol y espectro AM1.5G. Estos fotones son insuficientes para mejorar a una célula de silicio que puede generar hasta 44 mA/cm² usando las porciones visibles y ultravioletas del espectro solar. Incluso en el caso de emplear estructuras de tres capas, en las que la sub-célula de silicio fuese la capa correspondiente al visible, resulta complejo realizar un reparto eficiente de esos 44 mA/cm² de la originaria célula de silicio entre dos sub-células ultravioleta e infrarroja sin limitar los escasos fotones disponibles para la sub-célula infrarroja. Además, la sub-célula infrarroja está sujeta a pérdidas por reflexión en su interfaz con la sub-célula superior de silicio y a pérdidas por transmisión de los fotones del infrarrojo más lejano. Por tanto, no resulta viable una estructura tándem con conexión en serie que combina una sub-célula de silicio y una sub-célula con anchura de banda prohibida.

En el caso de células tándem con una sub-célula de silicio actuando como captadora de la región infrarroja sí que es posible obtener células muy eficientes, incluso empleando únicamente dos capas. Para el caso de una célula solar tándem de dos capas con conexión eléctrica en serie, siendo la sub-célula infrarroja una sub-célula de silicio con eficiencia del 25%, esta estructura permitiría obtener una eficiencia teórica de hasta el 37% empleando un material de 1,75 eV de anchura de banda prohibida para la sub-célula ultravioleta. Existiría además una ganancia neta de eficiencia para un rango de materiales con anchuras de banda prohibida comprendidos entre 1,6 y 2,0 eV. Sin embargo, esta estructura es muy sensible a la anchura de la banda prohibida del material empleado para la otra sub-célula (sub-célula ultravioleta), viéndose la eficiencia de la sub-célula de silicio afectada por el hecho de que se implemente sobre ella otra célula ultravioleta y limitando el rango de materiales empleables. En este sentido muy recientemente ha sido presentada por S. Essig (6th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics, marzo de 2016, Chambéry, France), una célula tándem del 29.8 % de eficiencia, considerada de récord mundial, en la que las células se han realizado independientemente y luego han sido apiladas mecánicamente. El dispositivo final era de cuatro terminales, con dos circuitos independientes, presentando, por tanto, una elevada complejidad, tanto de fabricación como en su uso.

El documento de patente US 5322572 B2 presenta una estructura con dos sub-células principales de InP y GaInAsP, respectivamente conectadas mediante tres electrodos: un contacto posterior, un conjunto de contactos superiores unidos a las sub-células de InP y un conjunto de contactos intermedios unidos a ambas sub-células y accesibles desde la cara exterior de la célula. El dispositivo cuenta, por lo tanto, únicamente con dos capas activas, utilizando derivados de silicio para funcionalidades auxiliares no relacionadas con la conversión de radiación solar.

En un segundo ejemplo, el documento de patente US 8088991 B2 presenta una célula fotovoltaica con dos sub-células de distintos materiales, pudiendo incluir sub-células de silicio. El dispositivo comprende asimismo tres terminales, dos de ellos ubicados en la cara externa de la célula y uno de ellos en la cara interna de la misma. El dispositivo presenta una configuración en serie, pero comprende elementos externos que establecen la corriente que circula entre los terminales, con el fin de evitar las limitaciones de corriente de la capa de menor absorción y maximizar la potencia. Dicho elemento externo puede ser, por ejemplo, un convertidor DC/DC para el seguimiento de punto máximo de potencia (MPPT, del inglés 'maximum power point tracking'). Las interfaces entre materiales se realizan entre capas con el mismo tipo de conductividad.

En un tercer ejemplo, en el documento de patente US 2003/0015700 A2 se presenta una célula fotovoltaica con múltiples sub-células de materiales cristalinos monolíticos, pudiendo incluir silicio. Para la integración monolítica de las uniones entre materiales se incorporan buffers de acomodación mediante óxidos monocristalinos de alta calidad. El dispositivo comprende tres contactos, estando dos de ellos situados en la cara exterior del mismo y estableciéndose una estructura en serie de las sub-células.

Se conocen asimismo estructuras tándem alternativas a la conexión en serie. En particular, se pueden implementar células tándem conectando en serie múltiples sub-células de un mismo material dentro de cada capa. A continuación, todas las capas se conectan entre sí en paralelo. En el caso de que la tensión

de operación de las sub-células de cada capa sea el resultado de multiplicar o dividir por dos la tensión de operación de las células de las capas adyacentes se obtiene una estructura simple, de sólo dos terminales eléctricos, que puede ser interconectada en un panel solar como una célula solar convencional.

5 Por ejemplo, el documento de patente EP 2490267 A2 muestra una célula tándem con conexiones de capas en paralelo, y comprendiendo una de las capas una sub-célula de silicio cristalino. Al contrario que en la conexión en serie, esta estructura permite utilizar la sub-célula de silicio como sub-célula ultravioleta, utilizando múltiples sub-células en serie de otro material como capa de captación del infrarrojo. Alternativamente, la misma estructura de capas conectadas en paralelo permite utilizar la sub-célula de silicio para captar el infrarrojo, obteniéndose eficiencias similares al caso de las células tándem en serie, pero con una menor sensibilidad de la eficiencia respecto del material empleado. Consecuentemente, también se minimiza la sensibilidad ante alteraciones del espectro solar con el que se ilumina la célula. No obstante, si se deseara extender esta estructura a una topología de tres capas con el fin de aproximarse al límite teórico (situado en torno al 40%), sería necesario implementar siete sub-células en cada célula: una para la capa ultravioleta, dos para la capa visible y cuatro para la capa infrarroja. Dicha complejidad de implementación resulta, por lo tanto, excesiva para los paneles fotovoltaicos actuales.

20 Por su parte, el documento de patente US 4948436 B2 presenta una célula tándem con conexiones de capas en paralelo que puede incluir sub-células de silicio amorfo o micro-cristalino. Cada sub-célula comprende una estructura p-i-n, conectándose las sub-células vecinas a través de regiones con el mismo tipo de conductividad (p o n). Se consigue así una estructura modular con dos electrodos que permite conectar en serie múltiples células tándem. El dispositivo puede comprender asimismo ranuras para la separación de las múltiples células. No obstante, el dispositivo presenta, entre otras, las limitaciones anteriormente descritas relativas a su eficiencia de conversión y a su extensión a topologías de tres capas.

25 Finalmente, en el documento US 2010/0263713 A1 se presenta una célula fotovoltaica que incorpora tres materiales conectados en paralelo, pudiendo incluir silicio. El dispositivo comprende cuatro contactos: un primer contacto conectado eléctricamente a una segunda región del primer material, un segundo contacto conectado a una primera región del primer material, un tercer contacto conectado a una primera región del segundo material y un cuarto contacto conectado al tercer material. Todos los contactos, a excepción del tercero, se encuentran accesibles desde la parte posterior del dispositivo, comprendiendo hendiduras de distintas profundidades para alcanzar a los materiales descritos. El dispositivo recurre a capas dieléctricas e inversores externos para el control de voltajes y la adaptación del sistema de cuatro contactos a paneles solares de dos contactos.

35 No obstante, sigue existiendo en el estado de la técnica la necesidad de una célula fotovoltaica tándem compatible con sub-células de silicio cristalino que supere las limitaciones descritas en cuanto a eficiencia máxima de conversión, sin aumentar significativamente la complejidad de los dispositivos y de su proceso de fabricación. Es deseable, además, que dicha célula fotovoltaica permita evitar los diodos túnel y cualquier elemento externo de acondicionamiento de señales para su conexión a paneles solares convencionales de dos terminales. Asimismo, es deseable que todas las metalizaciones de la célula puedan realizarse en un mismo paso tecnológico, y que los recubrimientos metálicos de la cara frontal sean de la menor área posible.

45 **Descripción de la invención**

La presente invención soluciona los problemas anteriormente descritos mediante una célula fotovoltaica tipo "tándem" con asociaciones eléctricas en serie de las sub-células de cada capa y en paralelo de las capas entre sí, y con uniones entre capas a través de regiones que comparten el mismo tipo de conductividad.

En un primer aspecto de la invención se presenta una célula fotovoltaica que comprende sub-células de al menos dos materiales semiconductores:

- 55 – Un primer semiconductor, con mayor anchura de banda prohibida y más cercano a la superficie de incidencia de la radiación electromagnética a convertir, que típicamente convierte la radiación solar con menores longitudes de onda, por lo general centradas en el ultravioleta, de energías típicamente superiores a los 1,4 eV.
- 60 – Un segundo semiconductor, con menor anchura de banda prohibida y más alejado de la superficie de incidencia de la radiación que el primer semiconductor. El segundo semiconductor es preferentemente silicio cristalino, si bien podría emplearse cualquiera de los que se usan como célula de visible en estructuras tándem o como célula individual, como puede ser silicio amorfo o telurio de cadmio o calcopiritas de las empleadas en células de las denominadas CIGS o incluso de las empleadas en las células tándem de materiales III-V, como arseniuro de galio o arseniuro de galio y aluminio y otras. Sin embargo, en la presente invención la segunda sub-célula debe

5 presentar una estructura de contactos posteriores y aunque tecnológicamente es posible realizarla en los materiales mencionados, actualmente sólo se realizan y son comerciales en células de silicio, debido bien a la insuficiente longitud de difusión de los portadores minoritarios de algunos de los materiales mencionados o a la complejidad tecnológica para delinear la cara posterior del dispositivo, que está bien resuelta en el caso de células de silicio. Este segundo semiconductor puede operar absorbiendo la radiación solar con longitudes de onda centradas en el visible y/o infrarrojo dependiendo del número de capas del dispositivo.

- 10 – En algunas realizaciones, también un tercer semiconductor con menor anchura de banda prohibida y más alejado de la superficie de incidencia de la radiación que el primer semiconductor. El tercer semiconductor está integrado en al menos dos sub-células conectadas en serie entre sí, y en paralelo al segundo semiconductor. El tercer semiconductor típicamente convierte la radiación solar con longitudes de onda centradas en el infrarrojo más allá de la radiación absorbible por el segundo semiconductor, que en el caso de estar implementado en silicio sucede para longitudes de onda de la luz superiores a los 1,1 micrómetros. Para dicho rango de longitudes superiores a 1,1 micrómetros el espectro solar incluye fotones capaces de generar fotocorrientes con valores de cerca de 26 mA/cm^2 con una densidad energética que supone el 20% de la energía total del espectro completo. Sin embargo, la limitación impuesta en esta invención de que las sub-células de este tercer semiconductor trabajen a tensión mitad que la sub-célula segunda, de silicio, limita la máxima corriente extraíble a la mitad y el incremento neto de eficiencia debido a este tercer semiconductor podrá ser del orden del 3%, lo que supone un valor próximo al 10% del total de la energía suministrada por el dispositivo completo.

25 El primer semiconductor y el segundo semiconductor definen una primera interfaz entre sí. Los materiales semiconductores a ambos lados de esta primera interfaz comprenden en la región más cercana a dicha primera interfaz un mismo tipo de portadores mayoritarios (es decir, un mismo tipo de conductividad de entre tipo p o tipo n). Igualmente, en las realizaciones en las que se utiliza un tercer semiconductor, los materiales semiconductores a ambos lados de una segunda interfaz entre el segundo semiconductor y el tercer semiconductor comprenden en la región más cercana a dicha segunda interfaz un mismo tipo de portadores mayoritarios, que puede coincidir o no con el tipo de portadores mayoritarios de la primera interfaz.

30 Asimismo, la célula fotovoltaica comprende tres terminales eléctricos o electrodos a través de los cuales se extrae la energía eléctrica generada por conversión de los fotones de la radiación electromagnética incidente:

- 35 – Un primer electrodo, conectado al primer semiconductor en un extremo opuesto a la primera interfaz, es decir, en una cara del primer semiconductor más próxima a la superficie de incidencia de la luz.
- 40 – Un segundo electrodo, conectado al segundo semiconductor y siendo accesible dicho electrodo desde un extremo opuesto a la superficie de radiación electromagnética. Es decir, el segundo electrodo se extiende, al menos parcialmente, hasta un contacto eléctrico en la parte posterior de la célula fotovoltaica.
- 45 – Un tercer electrodo, conectado al primer semiconductor y al segundo semiconductor, siendo accesible dicho electrodo desde un extremo opuesto a la superficie de radiación electromagnética. Es decir, el tercer electrodo se extiende, al menos parcialmente, hasta un contacto eléctrico en la parte posterior de la célula fotovoltaica.

50 En caso de una célula que incluye el tercer semiconductor, el segundo electrodo y el tercer electrodo están conectados a extremos opuestos de las sub-células de dicho tercer semiconductor. La combinación de conexiones en serie de las sub-células de una capa y de conexiones en paralelo entre capas, unida a interfaces con el mismo tipo de portador mayoritario y al posicionamiento de los electrodos, permite implementar células fotovoltaicas tándem de alta eficiencia, compatibles con silicio, sin incrementar la complejidad de su fabricación.

55 Las tensiones a las que operan las capas de los distintos semiconductores pueden operar de acuerdo con dos opciones preferentes:

- 60 – La tensión entre el primer electrodo y el tercer electrodo es de doble magnitud que la tensión entre el segundo electrodo y el tercer electrodo. Es decir, la capa más exterior opera al doble de tensión que las otras dos capas, permitiendo ventajosamente su conexión a paneles fotovoltaicos de dos terminales.

65

- 5
- 10
- 15
- 20
- La tensión entre el primer electrodo y el tercer electrodo es de igual magnitud y de signo opuesto que la tensión entre el segundo electrodo y el tercer electrodo. Es decir, las tres capas operan aparentemente a la misma tensión. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, la sub-célula del primer semiconductor trabaja a tensión doble que la del segundo y ésta, a su vez, a tensión doble que cada una de las del tercer semiconductor. Internamente la conexión entre las sub-células del primer y segundo semiconductor se hace a través de un emisor flotante de éste último, capaz de mantener el exceso de voltaje sobre el terminal de base o sustrato de la sub-célula del segundo semiconductor. En esta opción el segundo terminal adopta la función de terminal de referencia, a pesar de no coincidir con la base o sustrato de la sub-célula del segundo semiconductor. De esta manera la tensión entre el primer electrodo y el segundo electrodo es de doble magnitud que la tensión entre el tercer electrodo y el segundo electrodo, permitiendo igualmente su conexión a paneles fotovoltaicos de dos terminales. Esta segunda opción presenta un circuito equivalente eléctrico más complejo y también su comprensión es de mayor dificultad, sin embargo, presenta algunas ventajas de implementación, pues en el caso de que la base o material sustrato del segundo semiconductor, silicio como realización preferente, sea del tipo n, lo que es habitual en células de silicio de contactos posteriores y alta eficiencia, también la cara externa o frontal del semiconductor primero podrá ser de tipo n, lo que posibilita evitar, en muchos casos, el tener que recurrir a capas externas conductoras y transparentes para la extracción de la corriente por el primer electrodo, debido a la mayor movilidad de electrones que de huecos para la mayoría de materiales semiconductores.

25

30

En un segundo aspecto de la presente invención se presenta un panel fotovoltaico que comprende una pluralidad de células fotovoltaicas de acuerdo con cualquiera de las configuraciones y opciones preferentes y realizaciones particulares descritas para el primer aspecto de la presente invención. Es decir, el panel fotovoltaico comprende una pluralidad de células con dos o tres capas de materiales semiconductores con conexiones en serie entre sub-células de una capa (en caso de haber capas con múltiples sub-células) y conexiones en paralelo entre capas, interfaces con un mismo tipo de portador mayoritario a ambos lados, y dos electrodos ubicados en la parte trasera de cada célula. El panel fotovoltaico comprende asimismo los medios de interconexión entre células, pudiendo conformar módulos de los denominados módulos planos.

35

40

Puesto que el primer material semiconductor de cada célula opera al doble de tensión que el segundo material semiconductor es posible su integración en módulos con sólo dos terminales eléctricos. En particular, el segundo electrodo de cada célula está conectado al primer electrodo de una primera célula adyacente y al tercer electrodo de una segunda célula adyacente. Preferiblemente, las interconexiones descritas se implementan mediante dos capas conductoras separadas por una capa aislante. Más preferentemente, cada capa conductora comprende una pluralidad de losetas (es decir, de elementos de conexión mayormente planos), abarcando cada loseta parcial o totalmente una superficie ocupada por dos células adyacentes.

45

Finalmente, en un tercer aspecto de la invención se presenta un método de fabricación de células fotovoltaicas de acuerdo con cualquiera de las configuraciones y opciones y realizaciones particulares descritas para el primer aspecto de la presente invención. El método comprende, al menos, los siguientes pasos:

- 50
- 55
- 60
- 65
- i. Crecer o depositar epitaxialmente o por algún procedimiento que origine capas cristalinas (como puede ser el crecimiento a temperatura suficiente por deposición química en fase vapor, conocido como CVD), al menos el primer semiconductor sobre el segundo semiconductor, que actúa como sustrato de todo el dispositivo, y donde el primer semiconductor tiene una mayor anchura de banda prohibida que el segundo semiconductor.
 - ii. En algunas realizaciones, crecer o depositar epitaxialmente o por algún procedimiento que origine capas cristalinas (como puede ser el crecimiento a temperatura suficiente por CVD), al menos el tercer semiconductor sobre el segundo semiconductor, en una cara opuesta a la cara de deposición del primer semiconductor, y teniendo el tercer semiconductor una menor anchura de banda prohibida que el segundo semiconductor.
 - iii. Formar, típicamente mediante metalización, un primer electrodo conectado al primer semiconductor en un extremo opuesto a una primera interfaz entre el primer semiconductor y el segundo semiconductor.
 - iv. Formar, típicamente mediante metalización, un segundo electrodo conectado al primer semiconductor y al segundo semiconductor, siendo el segundo electrodo accesible desde un extremo opuesto a la superficie de incidencia de radiación electromagnética.

- v. Formar, típicamente mediante metalización, un tercer electrodo conectado al segundo semiconductor y accesible desde el extremo opuesto a la superficie de incidencia de radiación electromagnética

5 La célula, panel y método descritos proporcionan, por lo tanto, una tecnología capaz de alcanzar eficiencias de conversión muy elevadas (del orden del 39-40%), de fácil fabricación, y compatible con sub-células de silicio cristalino. Se evitan además los diodos túnel, así como los elementos externos de acondicionado de señales para conexión a paneles solares convencionales de dos terminales. Asimismo, todas las metalizaciones de la célula puedan realizarse en un mismo paso tecnológico, simplificando la
10 fabricación de los dispositivos. La eficiencia tecnológicamente alcanzable con este dispositivo se estima en el 39,5 %, muy superior al 25 % obtenible por las actuales células solares basadas en silicio. Estos valores de eficiencia son posibles gracias a la existencia de diversos circuitos eléctricos por los que los electrones pueden ser extraídos de los semiconductores que comprenden el dispositivo a diferentes niveles de tensión: dos niveles de tensión diferentes cuando se emplean dos materiales semiconductores y tres
15 niveles cuando se emplean tres semiconductores. El circuito eléctrico de mayor tensión es por donde circulan los electrones cuya energía proviene de los fotones más energéticos y de idéntica manera el circuito eléctrico de menor tensión corresponde a los electrones con energía proveniente en su mayor parte de los fotones menos energéticos.

20 Finalmente, el primer electrodo puede aportar una mayor tensión de operación respecto del electrodo de referencia, tercero o segundo electrodo, dependiendo del caso, que el electrodo restante, pero la corriente de salida de dicho primer electrodo es sensiblemente inferior. Esta propiedad posibilita que los recubrimientos metálicos de la cara frontal sean muy pequeños, inferiores incluso a los de una célula solar convencional. En el caso de las estructuras de tres o más terminales conocidas en el estado de la técnica,
25 las corrientes a ser extraídas por la cara frontal del dispositivo son siempre mayores, obligando a mayores recubrimientos metálicos.

Los diferentes aspectos y realizaciones de la invención definidos en los párrafos anteriores pueden combinarse entre sí, siempre y cuando sean compatibles.

30 Estas y otras ventajas de la invención serán aparentes a la luz de la descripción detallada de la misma.

Descripción de las figuras

35 Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, y para complementar esta descripción, se acompañan como parte integrante de la misma las siguientes figuras, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo:

40 La figura 1 muestra el circuito eléctrico equivalente de un ejemplo de célula tándem de tres niveles con conexión en serie según el estado de la técnica.

La figura 2 muestra el circuito eléctrico equivalente de un ejemplo de célula tándem de tres niveles con conexión en paralelo según el estado de la técnica.

45 La figura 3 muestra el circuito eléctrico equivalente de un ejemplo de célula tándem de tres niveles según el estado de la técnica, en el que las sub-células de cada nivel operen a una tensión doble que las del siguiente nivel.

50 La figura 4 muestra la estructura de una célula fotovoltaica tipo tándem de tres niveles y tres terminales, de acuerdo con una primera realización de la presente invención.

La figura 5 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha primera realización.

55 La figura 6 muestra la estructura de una célula fotovoltaica tipo tándem de tres niveles y tres terminales, de acuerdo con una segunda realización de la presente invención.

La figura 7 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha segunda realización.

60 La figura 8 muestra la estructura de una célula fotovoltaica tipo tándem de dos niveles y tres terminales, de acuerdo con una tercera realización de la presente invención.

La figura 9 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha tercera realización.

65 La figura 10 muestra la estructura de una célula fotovoltaica tipo tándem de dos niveles y tres terminales,

de acuerdo con una cuarta realización de la presente invención.

La figura 11 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha cuarta realización.

5 La figura 12 muestra la estructura de una célula fotovoltaica con membranas permeables y selectivas respecto de los portadores de corriente, de acuerdo con una quinta realización de la presente invención.

La figura 13 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha quinta realización.

10 La figura 14 presenta una vista frontal anterior de una célula solar fotovoltaica, de acuerdo con cualquiera de las cinco realizaciones anteriores de la presente invención. En la figura se han representado tres barras de extracción de corriente o bus-bars aunque este número puede ser variable o incluso no existir.

15 La figura 15 presenta una vista frontal posterior de una célula solar fotovoltaica, de acuerdo con cualquiera de las cinco realizaciones anteriores de la presente invención.

La figura 16 ilustra la representación esquemática empleada para la descripción de la conexión entre células de la presente invención, considerándose el electrodo T3 como terminal de referencia (si bien, dependiendo de la realización, dicho electrodo de referencia pueda ser el denominado T2 o el T3).

20

La figura 17 muestra esquemáticamente la interconexión entre células de un panel fotovoltaico según una sexta realización posible de la presente invención, permitiendo integrar células de tres terminales en paneles solares de dos terminales.

25 La figura 18 presenta con mayor detalle la interconexión entre células mediante dos planos de conducción, según dicha sexta realización preferente.

Las figuras 19a, 19b y 19c presentan, respectivamente, las vistas anterior, lateral y posterior del sistema de planos de conducción de dicha sexta realización preferente.

30

La figura 20 muestra un detalle de una implementación práctica del conjunto laminado utilizado en dicha sexta realización preferente.

35 La figura 21 muestra un diagrama de fabricación de una célula fotovoltaica según una realización preferente del método de fabricación de la invención.

Realización preferente de la invención

40 Por claridad, en la presente descripción se denota como "superior", "anterior" y "frontal" a la región del dispositivo más próxima a la superficie de incidencia de la radiación electromagnética a convertir. Igualmente, se denota como "inferior" y "posterior" a la región del dispositivo contraria a la superficie de incidencia de la radiación electromagnética a convertir.

45 Asimismo, en la presente descripción se denota como "capa ultravioleta", "sub-célula ultravioleta", etc., a la capa/sub-célula/etc. implementada con el primer semiconductor, de mayor anchura de banda prohibida, y, por lo tanto, encargado de convertir los fotones de menor longitud de onda. No obstante, dicha nomenclatura debe interpretarse como una notación relativa para distinguir los distintos elementos de la célula, y no como una limitación del rango exacto de longitudes de onda absorbidas por dichos elementos, que quedará determinado por las propiedades del material particular elegido como primer semiconductor en cada implementación. Igualmente, en la presente descripción se denota como "capa visible", "sub-célula visible", etc., a la capa/sub-célula/etc. implementada con el segundo semiconductor, de anchura de banda prohibida intermedia; y como "capa infrarroja", "sub-célula infrarroja", etc., a la capa/sub-célula/etc. implementada con el tercer semiconductor, de menor anchura de banda prohibida; siendo aplicables, *mutatis mutandis*, las mismas consideraciones sobre la nomenclatura expuestas para el término "ultravioleta".

50 Las figuras 1, 2 y 3 presentan los equivalentes eléctricos de configuraciones conocidas en el estado de la técnica para células fotovoltaicas con tres materiales semiconductores, es decir, con al menos una sub-célula ultravioleta 1, al menos una sub-célula visible 2 y al menos una sub-célula infrarroja 3. En particular, la figura 1 presenta una conexión en serie entre sub-células, cuya eficiencia de conversión queda mermada por el límite de intensidad generada por la sub-célula infrarroja 3. La figura 2 presenta una célula tándem general con conexiones en paralelo, mientras que la figura 3 presenta una célula tándem en el que las sub-células de cada capa operan a una tensión mitad que las sub-células de la capa inmediatamente superior, facilitando su integración en módulos solares de dos terminales. En ambos casos, son necesarios un gran número de sub-células para implementar cada célula, con la consiguiente complejidad de

65

fabricación y con una posible reducción de eficiencia debida a las desviaciones de fabricación y los efectos de depositado de cada capa sobre las anteriores.

5 Frente a las limitaciones de las configuraciones conocidas en el estado de la técnica, la figura 4 presenta una primera realización preferente de la célula fotovoltaica C_i de la invención, comprendiendo una sub-célula ultravioleta 1, una sub-célula visible 2 y dos sub-células infrarrojas 3. La sub-célula visible 2 está preferentemente implementada en silicio cristalino, la sub-célula ultravioleta 1 está implementada en un material con una anchura de banda prohibida mayor que el de la sub-célula visible 2, típicamente entre 1,5 eV y 2,5 eV, y la sub-célula infrarroja 3 está implementada en un material con una anchura de banda prohibida menor que el de la sub-célula visible 2, típicamente entre 0,6 y 0,9 eV. La célula ultra-violeta es la más cercana a la incidencia de la radiación electromagnética, absorbiendo los fotones más energéticos de la misma y siendo invisible al resto, que pasan a las capas posteriores.

15 Por ejemplo, la sub-célula ultravioleta 1 puede estar implementada en carburo de silicio cristalino o fosfuro de galio o en semiconductores de la familia $ZnIVN_2$; y la sub-célula infrarroja 3 puede estar implementada en silicio-germanio. Nótese, no obstante, que la topología descrita para la célula fotovoltaica de la invención es compatible con otras combinaciones de materiales conocidas en el estado de la técnica para células tándem generales. Nótese asimismo, que en el caso de células de dos niveles, el silicio cristalino puede adoptar tanto la función de sub-célula ultravioleta 1 como de sub-célula infrarroja 3.

20 La célula fotovoltaica C_i comprende asimismo tres terminales o electrodos eléctricos: un primer electrodo T1 conectado eléctricamente a la sub-célula ultra-violeta 1 a través de un primer contacto eléctrico 11; un segundo electrodo T2 o electrodo positivo conectado eléctricamente a la sub-célula visible 2 y una de las sub-células infrarrojas 3 a través de un segundo contacto eléctrico 9; y un tercer electrodo T3, también denominado electrodo negativo o electrodo de referencia, conectado a las tres capas de sub-células a través de un tercer contacto eléctrico 10.

30 Puesto que la tensión de operación de cada sub-célula infrarroja 3 es menor que la tensión de operación de la sub-célula visible 2, la capa infrarroja comprende múltiples sub-células conectadas en serie. En el caso particular de dos sub-células de la figura 4, una primera sub-célula infrarroja 4, al estar situada en contacto con el segundo electrodo T2 tiene polaridad $p^+-p/n-n^+$, mientras que una segunda sub-célula infrarroja 5, al estar situada en contacto con el tercer electrodo T3 tiene polaridad $n^+-n/p-p^+$. Ambas pueden compartir el electrodo p^+ 6 y el electrodo n^+ 7 con la sub-célula visible 2. La interconexión en serie entre la primera sub-célula infrarroja 4 y la segunda sub-célula infrarroja 5 se realiza con una simple conexión 8 de sus electrodos más externos, empleando para ello un metal u otro material conductor.

40 Nótese que el segundo electrodo T2 y el tercer electrodo T3 son accesibles desde la cara posterior de la célula fotovoltaica C_i . Por lo tanto, una de las ventajas de la estructura propuesta es que todas las metalizaciones posteriores pueden realizarse en el mismo paso tecnológico, incluyendo el segundo electrodo T2, el segundo contacto eléctrico 9, el tercer electrodo T3, el tercer contacto eléctrico 10, y la conexión 8.

45 Una propiedad diferenciadora de la estructura propuesta es que todas las interfaces entre diferentes sub-células se realizan empleando para cada sub-célula a los lados de la interfaz materiales del mismo tipo electrónico. Es decir, las superficies exteriores tipo p de la sub-célula visible 2 siempre conectan con superficies tipo p tanto para sub-células infrarrojas 3 como para las sub-células ultravioleta 1. De idéntica manera, las superficies exteriores tipo n de la sub-célula visible 2 pueden albergar células superiores o inferiores con una superficie tipo n en su superficie de contacto con la sub-célula visible 2. De esta manera, todos los contactos entre sub-células son óhmicos y el acceso a todos los terminales internos de las sub-células ultravioleta 1 y las sub-células infrarrojas 3 puede realizarse desde la célula visible 2. Al realizar todas las transiciones entre células a través de regiones del mismo tipo (p-p o n-n), todos los planos en los que las concentraciones de ambos portadores son similares ($p \approx n$), se sitúan en la región interior de cada material, lejos de las transiciones entre sub-células, lo que reduce notablemente la recombinación de portadores y posibilita mayores eficiencias.

55 Para una célula fotovoltaica C_i cuyo material de sustrato (es decir, el material de la sub-célula visible 2) es de tipo n, como la representada en la figura 4, la superficie frontal puede pasivarse mediante una capa pasivante 12 tipo n. En ese caso, la sub-célula ultravioleta 1 debe tener una superficie inferior 13 en contacto con la sub-célula visible 2 de tipo n. Puesto que la sub-célula ultravioleta 1 está realizada por un material de mayor anchura de banda prohibida que el de la sub-célula visible 2, su concentración intrínseca de portadores será típicamente de un valor muy pequeño comparativamente al del material de la sub-célula visible 2, por lo que dicho material de alto valor de banda prohibida puede actuar como pasivante. En ese caso, puede obviarse la capa pasivante 12.

65 Siguiendo con el caso de emplear como material de sustrato un semiconductor tipo n, la superficie superior

14 de la sub-célula ultravioleta 1 debe ser de tipo p. Puesto que la mayoría de materiales presentan movilidades de huecos muy reducidas y el espesor de la capa ultra-violeta es pequeño, es posible que su resistencia serie asociada sea alta y no pueda servir por sí misma para extraer adecuadamente toda la corriente hacia el primer electrodo T1. En este caso, además del primer contacto 11 puede incluirse una
 5 capa conductora 15 que recubre la superficie frontal del dispositivo y que presenta una elevada transparencia a todo el espectro de fotones útil para la célula. Dicha capa conductora puede realizarse, por ejemplo, mediante óxidos de indio y estaño (ITO) u otros óxidos transparentes conductores (TCO). Alternativamente, la capa conductora 15 puede realizarse mediante grafeno, que cumple además la doble
 10 función de pasivar la superficie superior 14 de la sub-célula ultravioleta 1 al tiempo que mejora la extracción de corriente al reducir la resistencia serie asociada.

La célula fotovoltaica comprende preferentemente al menos una primera membrana selectiva 16 con transporte por efecto túnel que sustituye las uniones p-n. Dicha primera membrana selectiva 16 es un
 15 dieléctrico de espesor suficientemente pequeño para que pueda ser atravesado por los portadores de corriente mediante efecto túnel. Estas barreras pueden ser selectivas respecto de los electrones o respecto de los huecos. Para que uno de dichos portadores de corriente pueda atravesarlas es preciso que no exista un salto apreciable de la energía del portador a ambos lados de la barrera, es decir, es preciso que para la posición energética que ocupa un electrón o hueco en el material de origen, exista el mismo nivel energético permitido en el material de destino. La probabilidad de tránsito es función tanto del
 20 espesor del dieléctrico a atravesar como del cambio necesario en la impulsión cristalina del portador a ambos lados de la barrera, razón por la que la estructura de bandas de los materiales origen y destino interviene en el mecanismo de transporte de corriente. Empleando materiales de diferente anchura de la banda prohibida como materiales de origen y destino de los portadores, o bien con idéntica anchura de banda prohibida pero ligeramente desplazada en energías a ambos lados del material dieléctrico, es posible hacer que sólo uno de ambos portadores pueda atravesarla, empleándose esta cualidad para la
 25 construcción de membranas permeables a un solo tipo de portadores. El espesor de la capa dieléctrica, que es crítico para una circulación de corriente aceptable, debe ser de unos 20 angstroms o inferior. Como material típico se puede usar óxido de silicio, que en espesores pequeños cristaliza en forma de cristobalita y origina una estructura con dimensiones mínimas de 16 angstroms, adecuadas a este fin.

La primera membrana selectiva 16 se coloca en la parte posterior de la sub-célula visible 2. Tras este óxido se depositan selectivamente regiones de material (electrodo p⁺ 6 y electrodo n⁺ 7) cuyas funciones
 30 trabajo de extracción garanticen que se inducen regiones tipo p 17 o tipo n 18 en la región de base de la sub-célula visible 2 recubierta por la primera membrana selectiva 16. También es posible realizar una estructura equivalente sin la necesidad de implementar las capas dieléctricas, y realizando las regiones tipo p 17 o tipo n 18 en la región de base de la sub-célula visible 2 mediante difusión de impurezas. No obstante, la eficiencia de esta estructura será menor debido a la alta recombinación que supone su
 35 continuidad hasta el semiconductor de menor anchura de banda prohibida 19, sin la existencia de una capa pasivante intermedia, misión que viene bien cubierta por la membrana 16. La estructura de bandas de las capas depositadas permite que por el electrodo p⁺ 6 sea posible el tránsito de huecos por efecto túnel. De idéntica manera, el electrodo n⁺ 7 que induce regiones tipo n 18 presenta una estructura de bandas que hace posible el tránsito de electrones entre dicho electrodo n⁺ 7 y la sub-célula visible 2. Preferentemente, las regiones de los electrodos p⁺ 6 y electrodo n⁺ 7 están constituidas por polisilicio dopado tipo p y tipo n, respectivamente. Estas capas de polisilicio pueden actuar al mismo tiempo como
 40 regiones de emisor de las sub-células infrarrojas 3. Estas sub-células infrarrojas 3 pueden tener sus regiones de base 19 de idéntico tipo y dopaje, de manera que puedan ser realizadas en el mismo proceso tecnológico. Posteriormente, se depositan los emisores posteriores 20 y 21 de ambas sub-células infrarrojas 3, presentando diferentes tipos electrónicos para cada una de ellas. Previa a la realización de los contactos eléctricos de la cara posterior 8, 9 y 10, que constituyen tanto los electrodos externos T2 y
 45 T3 como la interconexión entre las dos sub-células infrarrojas 3, es preciso crecer o depositar una capa aislante 22 que evite el cortocircuito de estas sub-células infrarrojas.

Las membranas selectivas por efecto túnel también pueden ser empleadas en la sub-célula ultravioleta 1. En este caso, la sub-célula ultravioleta 1 necesita una región donde los portadores generados por fotones
 55 de alta energía puedan permanecer un tiempo suficiente como para ser extraídos antes de ser reincorporados a la situación de bajo nivel energético. Una región tipo p de un material con elevada anchura de la banda prohibida basta para almacenar electrones de alta energía, en el caso de ser éstos los portadores que se pretenden extraer. En caso de ser los huecos, se emplea una región tipo n. El dopaje de esta región puede ser variado gradualmente, siendo de mayor concentración en la zona más próxima a la interfaz con la sub-célula visible 2 y menos dopado en la superficie de la célula, de forma que los electrones acumulados prefieran acumularse cerca de la superficie frontal del dispositivo.

A fin de facilitar la conexión de estos contactos al circuito externo, la superficie posterior de la célula
 65 fotovoltaica C_i puede recubrirse parcialmente de una capa aislante 23. Esta capa aislante 23 deja sólo al descubierto las zonas de contacto del segundo electrodo T2 y del tercer electrodo T3, facilitando la

interconexión al circuito externo que puede realizarse mediante la aplicación selectiva de un material conductor, por ejemplo, mediante serigrafía.

5 La figura 5 muestra el circuito eléctrico equivalente asociado a la primera realización preferente de la célula fotovoltaica C_i, representada en la figura 4. Nótese que la sub-célula visible 2 opera a una tensión V, la sub-célula ultravioleta 1 opera a una tensión 2V y cada sub-célula infrarroja 3 opera a una tensión 0.5V.

10 En el caso de requerirse un primer contacto 11 de tipo n en vez de tipo p, bien atendiendo a razones de extracción de corriente u otros motivos tecnológicos, puede realizarse una estructura equivalente a la de la figura 4, sustituyendo las regiones tipo p por regiones tipo n y viceversa. Alternativamente, se puede mantener la distribución de regiones previamente descrita (segundo semiconductor tipo n) y añadir un emisor flotante 24 tipo p situado en la parte frontal de la sub-célula visible 2 tal como se presenta en la segunda realización preferente de la célula de la invención mostrada en la figura 6. En este caso la región central 25 tipo p de la sub-célula ultravioleta se pone en contacto con la superficie frontal de la sub-célula visible 2, mientras que la región tipo n 26 de esta sub-célula ultravioleta constituye la superficie semiconductor más exterior por la cara frontal del dispositivo completo.

20 La figura 7 muestra el circuito eléctrico equivalente asociado a la segunda realización preferente de la célula fotovoltaica C_i, representada en la figura 6. La sub-célula visible 2, que en este caso es una célula de contactos posteriores con emisor flotante en su cara frontal se representa a nivel eléctrico con un total de cuatro componentes: un diodo de unión pn posterior 27, sobre el que se desarrolla la tensión que se obtiene entre el segundo electrodo T2 y el tercer electrodo T3; un diodo frontal 28 que representa al emisor flotante 24 y en el que típicamente se colecciona la mayor parte de la corriente fotogenerada en la sub-célula visible 2, lo que se representa mediante un primer generador de corriente 29; y un segundo generador de corriente 30 para el transporte de corriente entre las dos uniones pn. La colección de corriente fotogenerada que se realiza directamente sobre la superficie posterior y que puede representarse mediante un generador de corriente en paralelo con la unión pn posterior 27 no ha sido representada pues aunque es de magnitud apreciable, su efecto no es relevante para la comprensión del funcionamiento de esta estructura.

30 Esta estructura puede beneficiarse de las mejoras de colección de corriente proporcionadas por células de contacto posterior mejoradas por colección en la cara frontal y transporte a la cara posterior mediante efecto transistor (TWT, del inglés 'Transistor Wrap Through'). Dicha mejora se presenta de forma general en WO 2006/051132 A1.

35 La presente invención puede asimismo implementarse mediante únicamente dos capas de semiconductor, que seguiremos denotando por consistencia sub-célula ultravioleta 1 y sub-célula visible 2, aunque sus rangos de absorción pueden verse modificados respecto a los casos anteriores para cubrir adecuadamente el espectro solar.

40 La figura 8 muestra una tercera implementación preferente de la célula solar de la invención, equivalente a la configuración de la primera implementación preferente mostrada por la figura 4, pero sin sub-células infrarrojas 3. La figura 9 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha tercera implementación preferente. Si bien la estructura presenta un aspecto de dos uniones en oposición o de transistor bipolar similar a otras conocidas en el estado de la técnica, en este caso el empleo de una estructura de célula de silicio de contactos posteriores simplifica notablemente la implementación y la interconexión en el módulo de este dispositivo.

50 Igualmente, la figura 10 muestra una cuarta implementación preferente de la célula solar de la invención, equivalente a la configuración de la segunda implementación preferente mostrada por la figura 6, pero sin sub-células infrarrojas 3. La sub-célula visible 2 presenta una región de base tipo n, y no existe ninguna difusión frontal tipo p, si bien ésta aparece tecnológicamente en la implementación de la sub-célula ultravioleta 1. La cara posterior de la sub-célula visible 2 incluyen los contactos positivo y negativo (segundo electrodo T2 y tercer electrodo T3), realizados mediante las membranas selectivas por efecto túnel descritas anteriormente. La sub-célula ultravioleta está realizada mediante una región central 25 de material de elevada anchura de banda prohibida dopado tipo p, preferentemente con un dopaje gradual, más dopado en el interior del dispositivo que en su superficie. En la cara externa de la región central 25 de absorción y almacenamiento de portadores se realiza una membrana selectiva respecto de los portadores de interés, formada por una segunda membrana selectiva 31 de efecto túnel (un dieléctrico de un reducido espesor, típicamente 20 angstroms o inferior), y en la parte externa 32 se sitúa un material cuya función trabajo de extracción sea capaz de extraer los portadores minoritarios de la región central 25 a la tensión adecuada. Un material excelente es aquel que sea semiconductor, con anchura de banda prohibida suficientemente mayor que la del material de absorción de la región central 25, de manera que no se introducen mermas apreciables en la corriente fotogenerada, y además presenta una resistividad pequeña para el tipo de portadores extraídos. El óxido de zinc puede ser, por ejemplo, un material adecuado para la

extracción de electrones de una estructura como la propuesta. De esta manera el contacto eléctrico puede situarse directamente sobre esta parte externa 32 sin necesidad de añadir otras adicionales que acomoden ambos materiales.

5 La figura 11 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha cuarta implementación preferente mostrada en la figura 10. Los diodos con símbolo modificado, representan las membranas selectivas realizadas en el dispositivo, con paso sólo para los electrones por el cátodo 33 del diodo y con pasos selectivos para electrones en cátodo y para huecos en ánodo 34. El diodo 35 no se realiza intencionadamente, pero aparece en el proceso de fabricación de la sub-célula ultravioleta 1 como una unión pn en la superficie frontal de la sub-célula visible 2.

10 La figura 12 muestra una quinta implementación preferente de la célula solar de la invención, también sin sub-células infrarrojas 3, y dual a la cuarta implementación preferente. En la sub-célula ultravioleta 1 se almacenan huecos de alta energía que son extraídos a través de la segunda membrana selectiva 31 de efecto túnel hacia un material adicional 36 capaz de incorporarlos al circuito eléctrico. Por ello, la sub-célula ultravioleta 1 está constituida por un semiconductor tipo n de elevada anchura de banda prohibida. Las propiedades pasivantes de esta capa tipo n respecto de la superficie frontal de la sub-célula visible 2 permiten prescindir de la capa pasivante 12 en la superficie frontal de la sub-célula visible 2.

15 La figura 13 muestra el circuito eléctrico equivalente de dicha quinta implementación preferente. En este caso, se muestran las dos uniones pn inducidas a través del óxido túnel, tanto en la sub-célula ultravioleta, en este caso sólo en su ánodo 37 como en ambos terminales 38 de la sub-célula visible.

20 Nótese que en el caso de mantener las sub-células infrarrojas 3 y eliminar la sub-célula ultravioleta 1 podría alcanzarse una configuración similar a la presentada en EP 2490267 A2. Las mejoras y características de las implementaciones particulares descritas en EP 2490267 A2 pueden aplicarse por lo tanto a implementaciones particulares de las sub-células infrarrojas 3 y a la sub-célula visible 2 de la presente invención, incluso en presencia de la sub-célula ultravioleta 1.

25 La figura 14 muestra una posible implementación de la cara frontal de una célula solar fotovoltaica 100, C_i , según cualquiera de las implementaciones descritas. El panel fotovoltaico 100 comprende una o varias líneas de corriente 101 (del inglés 'bus-bars'), sobre las que se sitúa una rejilla de dedos metálicos 102 paralelos entre sí y perpendiculares a las líneas de corriente 101, en forma de peine como es usual en células solares industriales. Los dedos metálicos 102 y las líneas de corriente 101 se corresponden con el primero electrodo T1 de la célula fotovoltaica C_i .

30 La figura 15 muestra una posible implementación de la cara trasera de una célula solar fotovoltaica 100, C_i , según cualquiera de las implementaciones descritas. Los segundos electrodos T2 y los terceros electrodos T3 se conectan en líneas paralelas alternas 103.

35 La figura 16 muestra el esquema empleado en la presente descripción para representar una célula fotovoltaica C_i . Se considera el tercer electrodo T3 como terminal común, respecto al cual se pueden conectar dos circuitos eléctricos diferentes según se emplee el primer electrodo T1 o el segundo electrodo T2 como terminal restante. Si bien, como ya se indicó anteriormente, dependiendo de la implementación realizada, el terminal común podrá ser el T2 en vez del T3. Denotaremos I_1 como la corriente extraída a través del primer electrodo T1, I_2 como la corriente extraída a través del segundo electrodo T2, V_1 como la tensión entre el primer electrodo T1 y el tercer electrodo T3 y V_2 como la tensión entre el segundo electrodo T2 y el tercer electrodo T3.

40 La figura 17 muestra un circuito de conexión de múltiples células fotovoltaicas C_i de acuerdo con una realización preferente del panel solar 100 de la invención. El circuito comprende $N+1$ células, obteniéndose una tensión final de NxV_2 y una corriente de $2xI_1+I_2$. Para la interconexión de las células fotovoltaicas C_i se propone realizar dos planos de conductores. La terminación de un módulo compuesto de $N+1$ células, como el aquí representado, requiere de la inclusión de una célula extra C_0 que trabaja a la tensión V_2 pero que aporta sólo la corriente I_1 . Para ello, se puede usar una célula adicional de menor área o bien integrar la célula extra C_0 en una primera célula C_1 de mayor área.

45 La figura 18 muestra un posible esquema de interconexión de las células fotovoltaicas C_i en dos planos de conductores: un plano superior 39 y un plano inferior 40. Cada plano está formado por losetas de un conductor eléctrico cuyo tamaño abarca el tamaño de dos células consecutivas, tanto en el plano superior 39 como en el plano inferior 40. Los dos planos conductores están separados por un dieléctrico 41. Para una célula determinada C_k , la loseta superior abarca al menos parcialmente el área de dicha célula C_k además del área de la célula siguiente C_{k+1} o la célula anterior C_{k-1} en el circuito eléctrico. Por el contrario, la loseta inferior abarca parcialmente el área de la célula C_k además del área completa correspondiente a la célula opuesta a la de la loseta superior (la célula siguiente C_{k+1} o la célula anterior C_{k-1}). Los tres

terminales de cada célula C_k se conectan a estas losetas de forma alternativa. El tercer electrodo T3 se conecta siempre a la loseta que se dirige hacia la célula anterior C_{k-1} , mientras que el segundo electrodo T2 se conecta a la que se dirige a la célula siguiente C_{k+1} . Por último, el primer electrodo T1 se conecta a la loseta que proviene de la célula siguiente C_{k+1} pero que abarca el área de la célula C_k .

5

Las figuras 19a, 19b y 19c muestran respectivamente una vista frontal, una vista lateral y una vista trasera de los planos de conductores 39, 40 descritos. En esta configuración, las corrientes que atraviesan cada célula fotovoltaica C_k es mayormente transversal a su estructura, y la longitud que recorren dichas corrientes es del orden del espesor de la célula fotovoltaica C_k , por lo que la resistencia serie asociada a la célula fotovoltaica C_k es también muy reducida. En el caso de emplearse cobre como material para las losetas basta espesores de 15 micrómetros para transportar la corriente en células de hasta 250 cm^2 de área sin pérdidas resistivas apreciables.

10

En el proceso de realización del laminado de los planos de conductores 39, 40 se pueden incluir diodos 42 entre las dos capas conductoras, conectando el ánodo al terminal negativo de la célula a situar en esa posición y el cátodo en la superficie contraria, de manera que los diodos 42 quedan en posición de anti-paralelo con la célula, constituyendo una eficiente protección contra la falta de uniformidad en la iluminación del módulo.

15

La figura 20 muestra la conexión de cada célula a cada nivel del circuito eléctrico, superior o inferior. Para ello, se realizan agujeros de interconexión 43 que permiten acceder al nivel inferior desde el nivel superior. Un anillo de guarda 44 alrededor de cada agujero de interconexión 43 es recomendable a fin de que el sobrante del adhesivo conductor empleado en la interconexión de los terminales de la célula al nivel inferior no cortocircuite ambos planos de conductores.

20

25

Finalmente, la figura 21 presenta una realización particular del proceso de fabricación de las células fotovoltaicas de la invención con tres niveles y dos sub-células en el nivel inferior. El experto en la materia podrá entender que el proceso puede adaptarse de manera sencilla (cambiando materiales, dopados, orden de deposición, estructuras de grabado, etc) para implementar las múltiples variantes de células fotovoltaicas descritas sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada.

30

La figura 21a muestra una oblea de silicio cristalino que sirve como soporte para el resto del dispositivo. La oblea de silicio cristalino puede texturarse en su cara frontal a fin de reducir la reflexión de la luz incidente. La oblea se difunde suavemente en ambiente de fósforo por su cara frontal, tal como se aprecia en la figura 21b, obteniéndose una región difundida de tipo n, según cualquiera de las estrategias conocidas en el estado de la técnica para dicha función. Por ejemplo, se puede difundir toda la superficie del semiconductor y posteriormente eliminar las regiones difundidas tanto de la cara posterior del dispositivo como de sus superficies laterales. También se puede difundir selectivamente sólo la superficie frontal, empleando enmascarantes de la difusión en la estructura restante o bien cubriendo la superficie frontal con algún precursor del material dopante y luego sometiendo al material a suficiente temperatura. También se puede no realizar dicha difusión frontal y esta aparecerá a lo largo de los diferentes procesos térmicos a los que se someterá el dispositivo a partir del dopante contenido en la siguiente capa de material semiconductor que se depositará en su superficie frontal.

35

40

La figura 21c muestra la deposición mediante deposición química en fase vapor (CVD, del inglés 'Chemical Vapor Deposition') del material de gran anchura de banda prohibida que conforma la sub-célula ultravioleta 1. Dicho material de gran anchura de banda prohibida es del mismo tipo electrónico que el empleado en la superficie de la sub-célula visible, pudiendo considerarse todas las variantes descritas en las realizaciones particulares de la célula. El material a depositar puede ser carburo de silicio cristalino, fosfuro de galio u otro que presente una anchura de su banda prohibida de al menos 1,5 eV cuando la sub-célula visible 2 es de silicio cristalino. El dopaje de esta capa puede ser variado, siendo más dopado en la interface con la sub-célula visible que a medida que se aleja de ella y finalmente invertido, de tipo n a tipo p, o viceversa, ya cerca de la superficie del material. También puede finalizarse esta capa sin invertir la polaridad del material, creciendo una fina capa de óxido capaz de ser atravesada por efecto túnel y luego depositando una capa de conductor transparente.

45

50

55

La figura 21d muestra la fabricación de la sub-célula visible 2 hasta el punto de acabarla en sus emisores tipo p y n o en las capas de polisilicio, así mismo tipo p y n, por los que se extrae la corriente de dicha sub-célula visible 2. Nótese que este proceso no incluye ningún paso de metalización o realización de contactos eléctricos.

60

La figura 21e muestra la deposición en la parte trasera de la sub-célula visible 2 del material de baja anchura de banda prohibida de la sub-célula infrarroja 3, como, por ejemplo, silicio-germanio con proporción variable a fin de ajustar la anchura de la banda prohibida. Este depósito puede crecerse mediante CVD haciendo reaccionar gases de silano y germano aunque también puede sustituirse por

65

fuentes basadas en órgano-metálicos de germanio. La deposición del material de silicio-germanio puede ser selectiva sobre la superficie posterior de la sub-célula visible 2, para lo que se puede oxidar parcialmente la superficie posterior de polisilicio de la célula. Sobre esta capa se deposita una capa de material de mayor anchura de banda prohibida a fin de que haga de emisor posterior. La deposición de este material de mayor anchura de banda prohibida puede realizarse del mismo tipo sobre tanto las regiones del electrodo p^+ 6 y el electrodo n^+ 7 y posteriormente ser dopados tipo p o n en su superficie mediante alguna técnica selectiva como puede ser la impresión de material conteniendo dopante sobre cada región bien por serigrafía o por inyección de tinta, seguida de un proceso térmico para la introducción y redistribución de estas impurezas en el material de mayor anchura de banda prohibida. Un material adecuado a este fin puede ser silicio depositado a temperaturas intermedias, entre 400 y 600 °C a partir de una fuente de silano, SiH_4 , u otra tradicional como puede ser el cloro-silano o dicloro-silano. El silicio puede depositarse en forma de policristales con tamaños de grano de varios micrómetros, suficiente para que cada grano contacte el material de bajo anchura de banda prohibida y el exterior de la célula solar. A continuación, se recubren las capas depositadas con un aislante eléctrico, que puede ser SiO_2 obtenido mediante una simple oxidación del polisilicio depositado. La figura 21f muestra la estructura resultante de estos procesos.

Posteriormente, es preciso eliminar todas las capas que recubren las zonas no recrecidas de los emisores del electrodo p^+ 6 y el electrodo n^+ 7. Puede optarse por abrir una ventana hasta estos emisores, bien mediante ataques selectivos realizados por serigrafía, mediante ablación láser u otras técnicas análogas. También se abren ventanas en regiones próximas de las capas de polisilicio tipo p y tipo n. La estructura resultante se representa en la figura 21g.

Posteriormente, se deposita metal sobre toda la superficie posterior de la célula y se elimina en determinadas áreas para evitar la existencia de cortocircuitos entre el segundo electrodo T2, el tercer electrodo T3 y la conexión 8 de las sub-células infrarrojas 3. Existen varias maneras de realizar este circuito de tres regiones eléctricas posteriores: bien imprimiéndolo por serigrafía u otra técnica análoga; bien depositando el metal sobre toda la superficie posterior y luego eliminando el sobrante mediante ataques químicos o ablación láser; o bien depositándolo en dos pasos y usando enmascarantes en cada uno de ellos. En un proceso previo o posterior a la metalización posterior, se deposita la capa antirreflejante en la superficie frontal y se realiza la metalización de dicha cara frontal, típicamente en forma de rejilla metálica. La figura 21h muestra la estructura tras estos pasos. Por último, se puede depositar, preferentemente por serigrafía, un aislante eléctrico en la cara inferior de la célula de forma que deje sólo al descubierto los puntos de conexionado eléctrico con el circuito externo de la célula solar, llegándose a la célula final de la figura 21i.

Para el conexionado eléctrico de todo el módulo se dispone de un laminado de dos capas de metal conductor con espesor entre 10 y 50 micras, que irá taladrado en su cara superior dejando una vía de conexión de la cara inferior desde la superior. Alrededor de los agujeros de interconexión 43 con la cara inferior se puede dejar un anillo de guarda 44 del metal de la cara frontal a fin de evitar cortocircuitos en el ensamblado. Para la constitución del circuito se aplica sobre los contactos eléctricos un adhesivo conductor y en las regiones restantes un adhesivo no conductor, lo que se puede hacer mediante serigrafía bien sobre la cara frontal del laminado bimetálico o bien sobre la superficie posterior de la célula. Esta segunda opción es preferible pues el tamaño de las células facilita su manejo en las impresiones serigráficas. Por último, se aplica el contacto frontal (primer electrodo T1) que contacta con una zona especialmente habilitada del laminado bimetálico y que dependiendo de la posición de la célula da acceso a su cara frontal o posterior. Por último, todo el circuito eléctrico antes constituido se lamina entre capas de vidrio u otro material transparente para la cara frontal y un aislante de intemperie tipo tedlar o equivalente para la cara posterior, lo que concluye la fabricación del módulo.

A la vista de esta descripción y figuras, el experto en la materia podrá entender que la invención ha sido descrita según algunas realizaciones preferentes de la misma, pero que múltiples variaciones pueden ser introducidas en dichas realizaciones preferentes, sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada.

En este texto, el término "comprende" y sus derivaciones (como "comprendiendo", etc.) no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no deben interpretarse como excluyentes de la posibilidad de que lo que se describe y define pueda incluir más elementos, etapas, etc.

REIVINDICACIONES

1. Célula fotovoltaica (C_i) que comprende al menos una sub-célula de un primer semiconductor (1) y una sub-célula de un segundo semiconductor (2), estando la sub-célula del primer semiconductor (1) más cercana a una superficie de incidencia de radiación electromagnética que la sub-célula del segundo semiconductor (2) y teniendo el primer semiconductor una mayor anchura de banda prohibida que el segundo semiconductor, caracterizado por que comprende:
- un primer electrodo (T1) conectado a la sub-célula del primer semiconductor (1) en un extremo opuesto a una primera interfaz entre el primer semiconductor y el segundo semiconductor, comprendiendo ambos lados de la primera interfaz un mismo tipo de portadores mayoritarios;
 - un segundo electrodo (T2) conectado a la sub-célula del primer semiconductor (1) y a la sub-célula del segundo semiconductor (2), siendo el segundo electrodo (T2) accesible desde un extremo opuesto a la superficie de incidencia de radiación electromagnética;
 - un tercer electrodo (T3) conectado a la sub-célula del segundo semiconductor (2) y accesible desde el extremo opuesto a la superficie de incidencia de radiación electromagnética.
2. Célula fotovoltaica (C_i) según la reivindicación 1 caracterizada por que el segundo semiconductor es silicio cristalino.
3. Célula fotovoltaica (C_i) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que comprende además al menos dos sub-células de un tercer semiconductor (3) con una menor anchura de banda prohibida que el segundo semiconductor, estando las al menos dos sub-células de un tercer semiconductor (3) conectadas en serie al segundo electrodo (T2) y el tercer electrodo (T3); y estando las al menos dos sub-células de un tercer semiconductor (3) conectadas a la sub-célula del segundo semiconductor (2) a través de una segunda interfaz opuesta a la primera interfaz, comprendiendo ambos lados de la segunda interfaz un mismo tipo de portadores mayoritarios.
4. Célula fotovoltaica (C_i) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que la tensión entre el primer electrodo (T1) y el segundo electrodo (T2) es de igual magnitud y de signo opuesto que la tensión entre el tercer electrodo (T3) y el segundo electrodo (T2).
5. Célula fotovoltaica (C_i) según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4 caracterizada por que la tensión entre el primer electrodo (T1) y el segundo electrodo (T2) es de igual signo y doble magnitud que la tensión entre el tercer electrodo (T3) y el segundo electrodo (T2).
6. Célula fotovoltaica (C_i) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que comprende además al menos una membrana selectiva (16, 31) con transporte por efecto túnel.
7. Célula fotovoltaica (C_i) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que comprende además al menos una capa pasivante (12).
8. Célula fotovoltaica (C_i) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que comprende además al menos una capa conductora (15).
9. Célula fotovoltaica (C_i) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizada por que comprende además al menos un emisor flotante (24).
10. Panel fotovoltaico (100) caracterizado por que comprende una pluralidad de células fotovoltaicas (C_i) de acuerdo a cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.
11. Panel fotovoltaico (100) según la reivindicación 10 caracterizado porque la tensión entre el primer electrodo (T1) y el tercer electrodo (T3) de cada célula fotovoltaica o electrodo de referencia (C_i) es de igual signo y doble magnitud que la tensión entre el segundo electrodo (T2) y el tercer electrodo (T3); y porque el segundo electrodo (T2) de cada célula (C_i) está conectado al primer electrodo (T1) de una primera célula adyacente (C_{i-1}) y al tercer electrodo (T3) de una segunda célula adyacente (C_{i+1}).
12. Panel fotovoltaico (100) según la reivindicación 11 caracterizado por que comprende dos capas conductoras (39, 40) separadas por una capa aislante (41).
13. Panel fotovoltaico (100) según la reivindicación 12 caracterizado por que las dos capas conductoras (39, 40) comprenden una pluralidad de losetas, abarcando cada loseta al menos parcialmente una superficie ocupada por dos células adyacentes.

14. Método de fabricación de células fotovoltaicas (C_i) que comprende crecer de forma cristalina al menos una sub-célula de un primer semiconductor (1) sobre una sub-célula de un segundo semiconductor (2), estando el primer semiconductor más cercano a una superficie de incidencia de radiación electromagnética que el segundo semiconductor y teniendo el primer semiconductor una mayor anchura de banda prohibida que el segundo semiconductor, caracterizado por que comprende formar:
- 5
- un primer electrodo (T1) conectado a la sub-célula del primer semiconductor (1) en un extremo opuesto a una primera interfaz entre el primer semiconductor y el segundo semiconductor, comprendiendo ambos lados de la primera interfaz un mismo tipo de portadores mayoritarios;

10

 - un segundo electrodo (T2) conectado a la sub-célula del segundo semiconductor (2) y accesible desde el extremo opuesto a la superficie de incidencia de radiación electromagnética; y

15

 - un tercer electrodo (T3) conectado a la sub-célula del primer semiconductor (1) y a la sub-célula del segundo semiconductor (2), siendo el segundo electrodo (T2) accesible desde un extremo opuesto a la superficie de incidencia de radiación electromagnética.
15. Método de fabricación de acuerdo con la reivindicación 14, caracterizado por que comprende además crecer cristalinamente sobre la sub-célula del segundo semiconductor (2) dos sub-células de un tercer semiconductor (3) con una menor anchura de banda prohibida que el segundo semiconductor, estando las al menos dos sub-células del tercer semiconductor (3) conectadas en serie al segundo electrodo (T2) y al tercer electrodo (T3); y estando las al menos dos sub-células de un tercer semiconductor (3) conectadas a la sub-célula del segundo semiconductor (2) a través de una segunda interfaz opuesta a la primera interfaz, comprendiendo ambos lados de la segunda interfaz un mismo tipo de portadores mayoritarios.
- 20

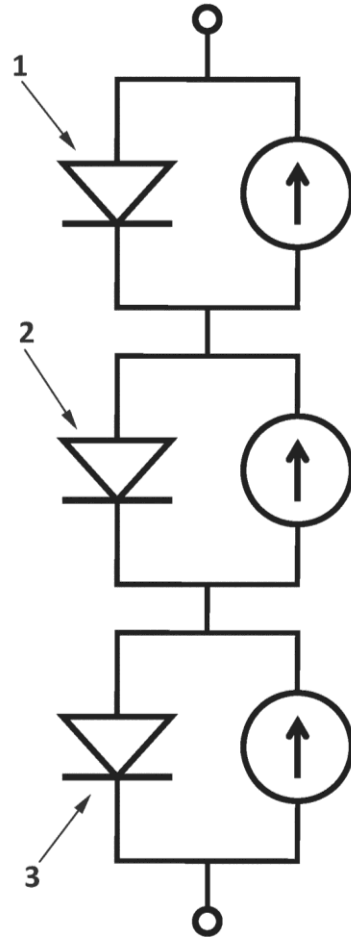


FIG. 1

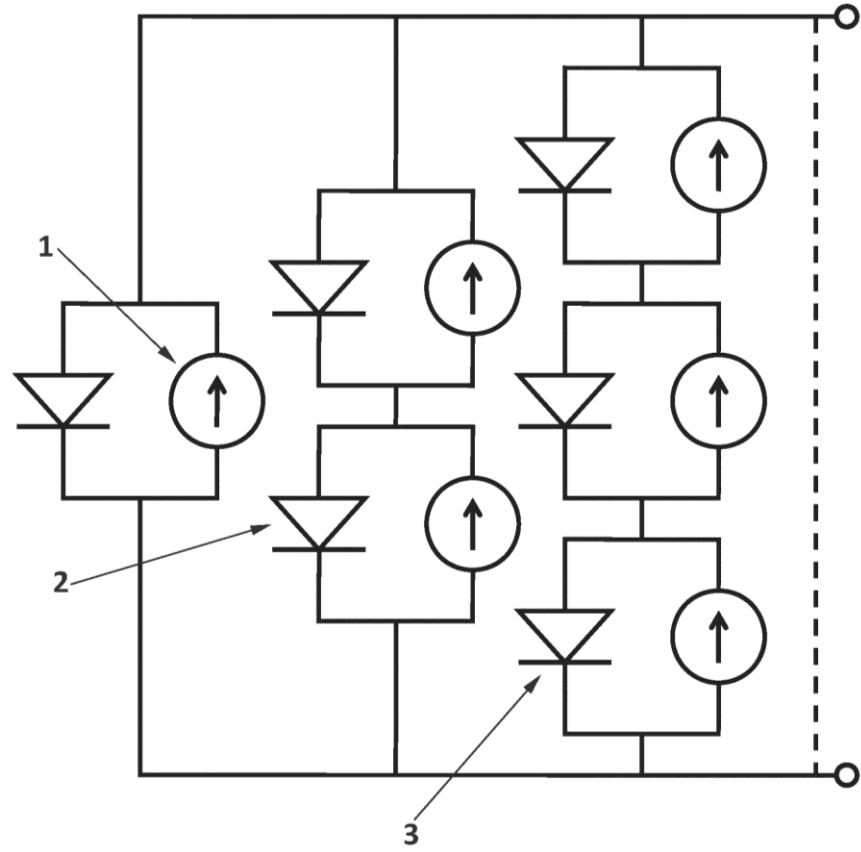


FIG. 2

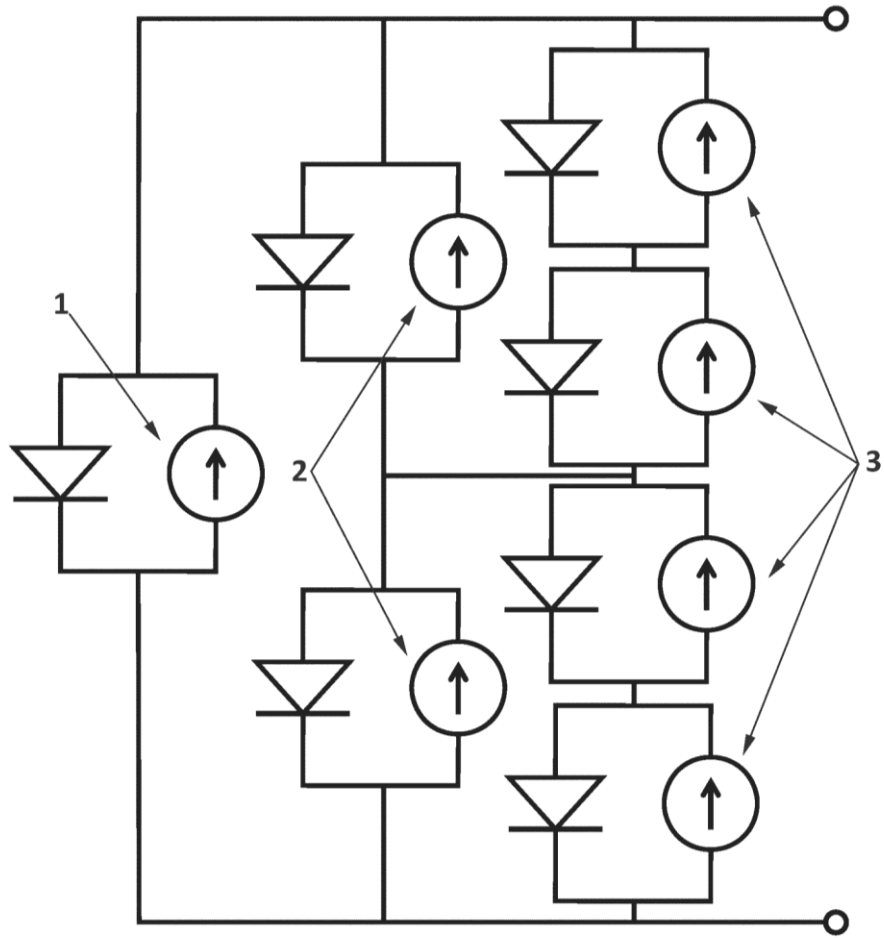


FIG. 3

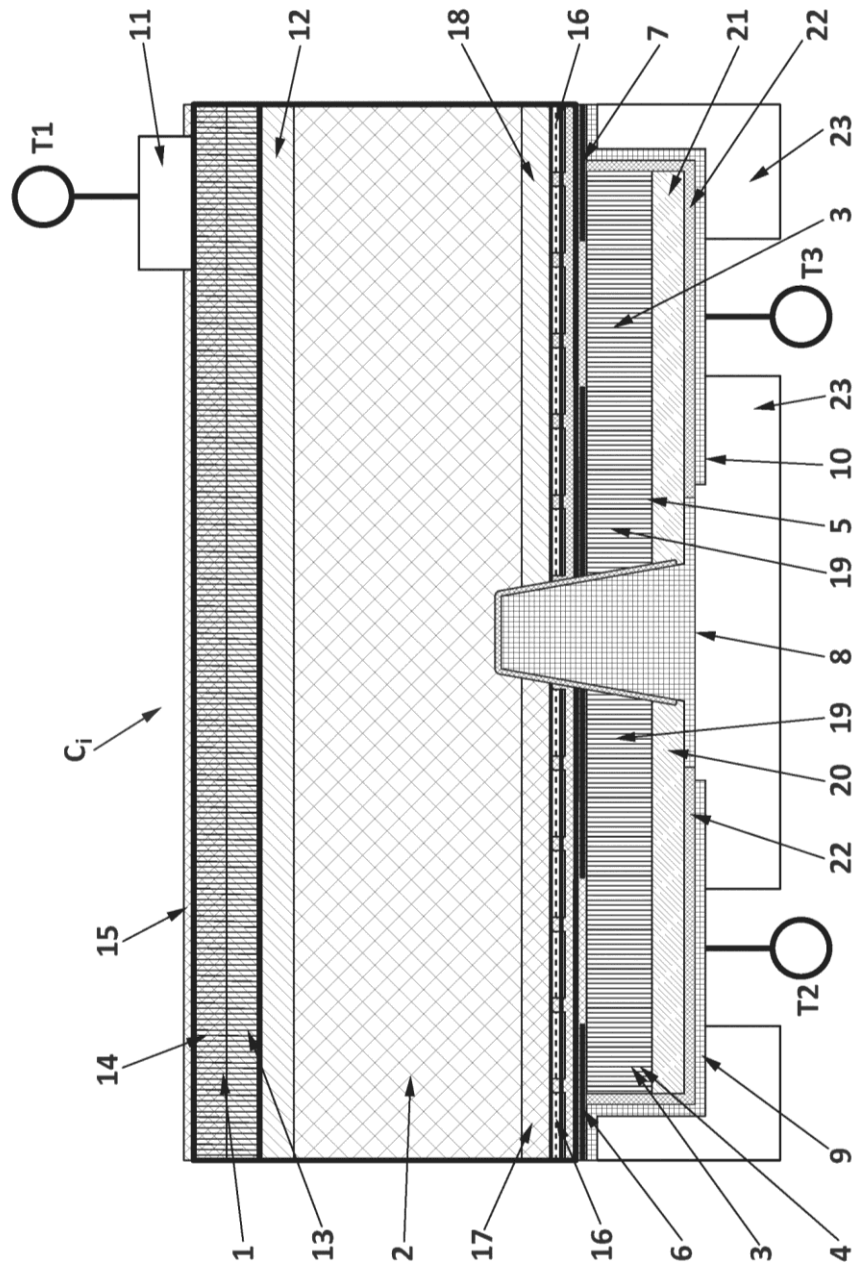


FIG. 4

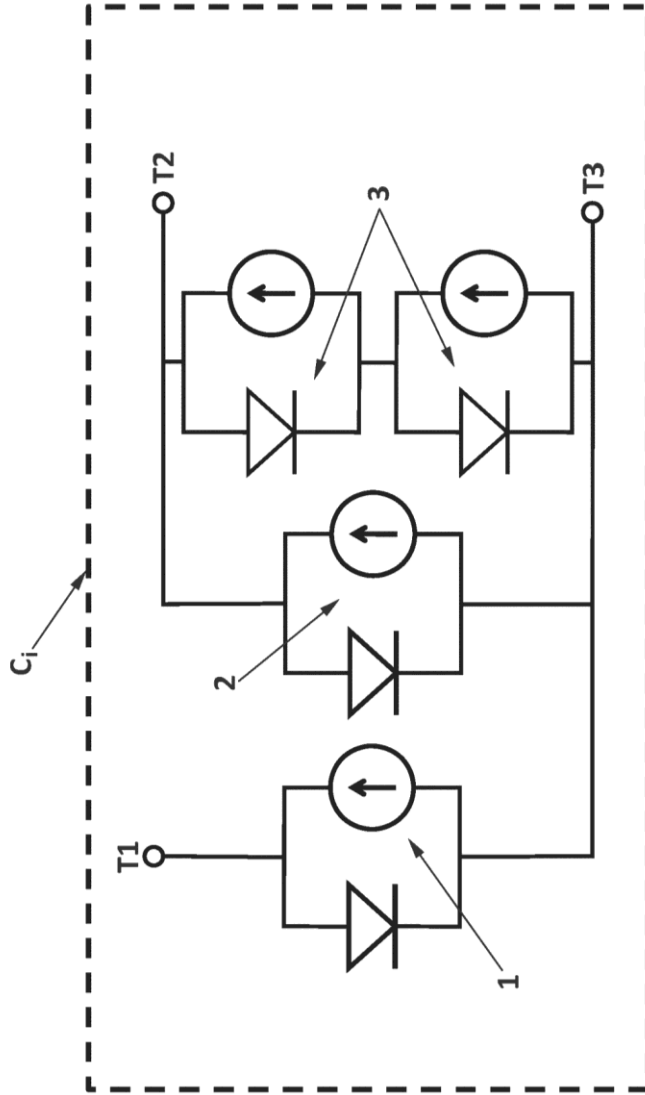


FIG. 5

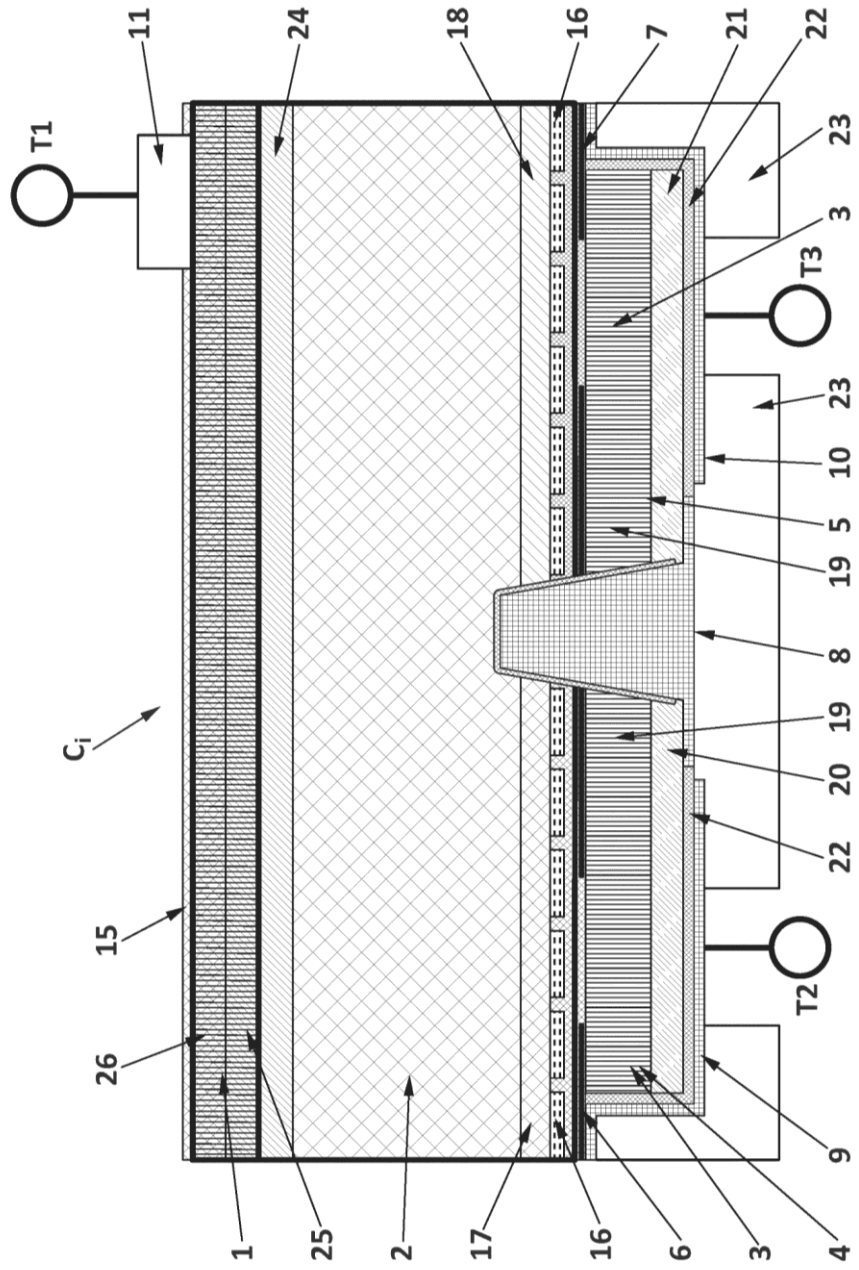


FIG. 6

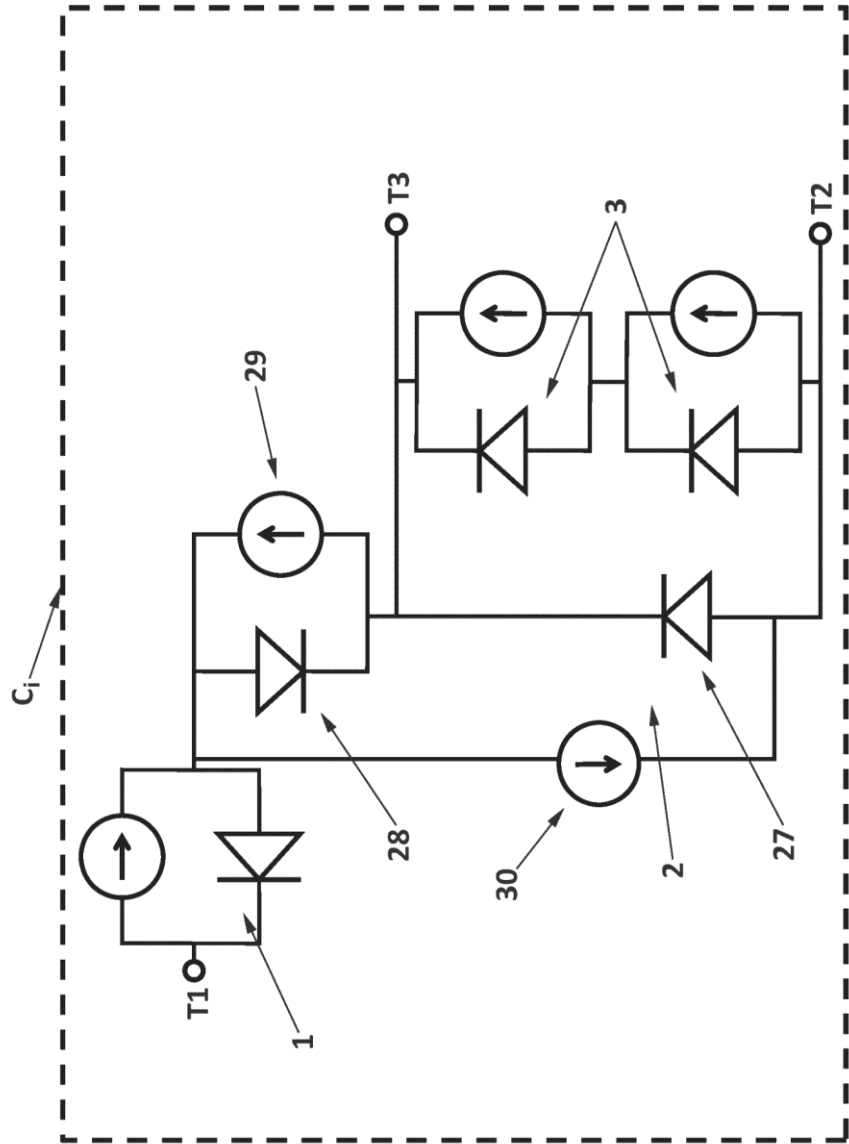


FIG. 7

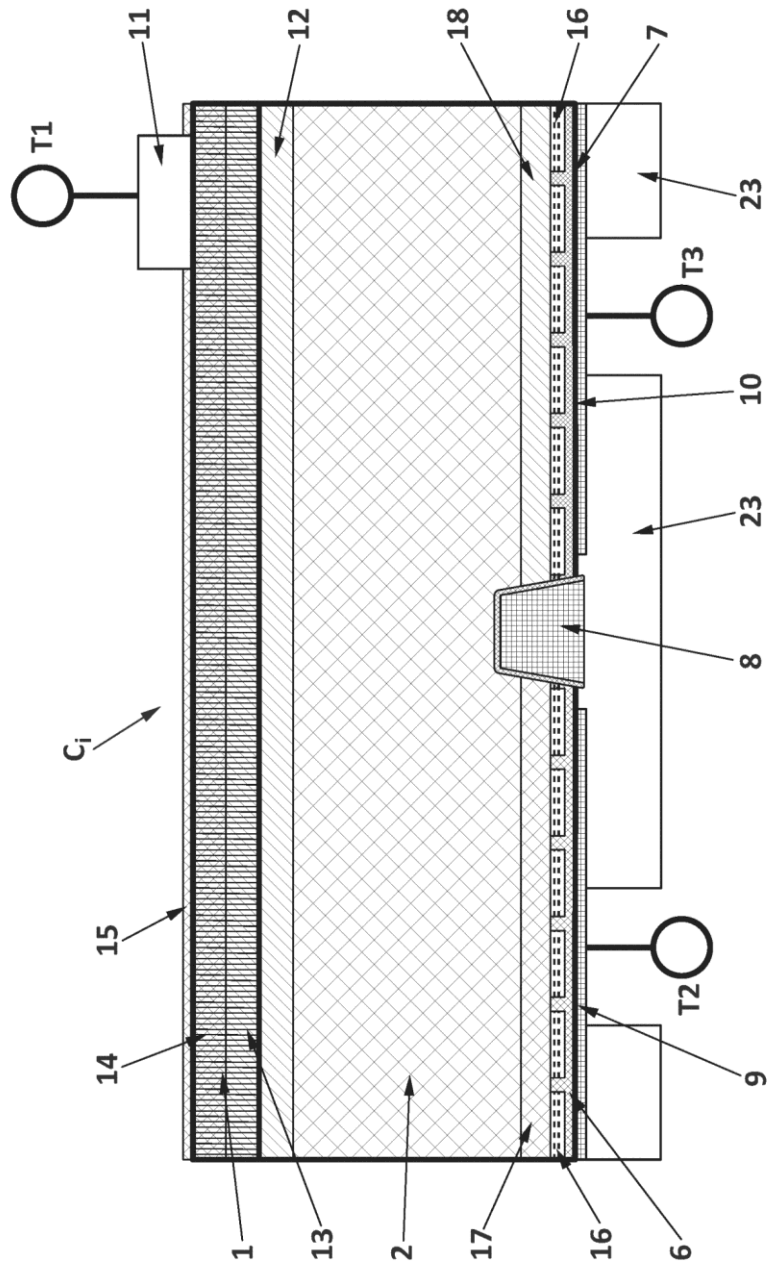


FIG. 8

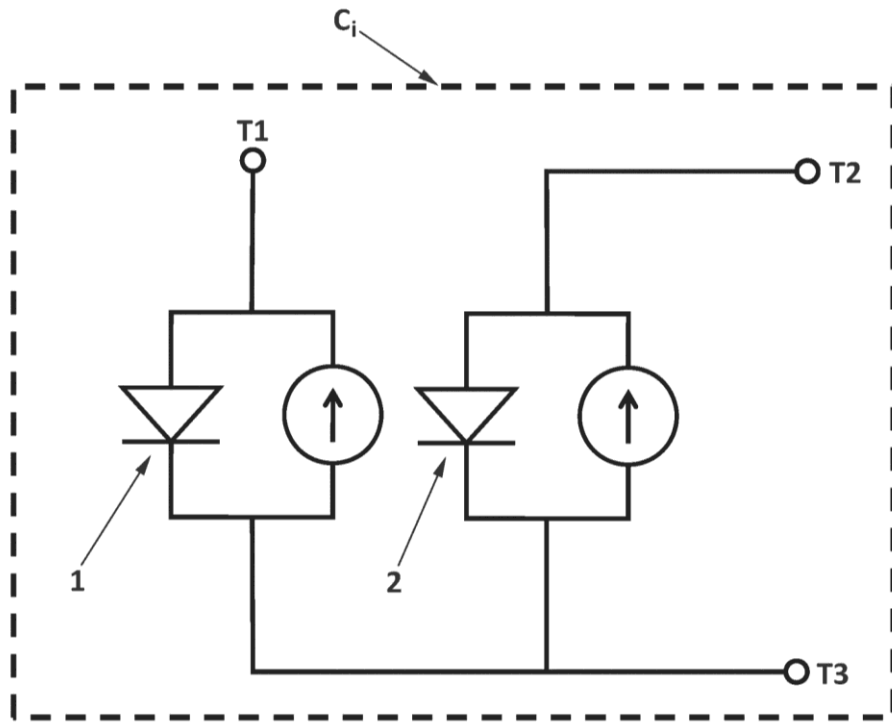


FIG. 9

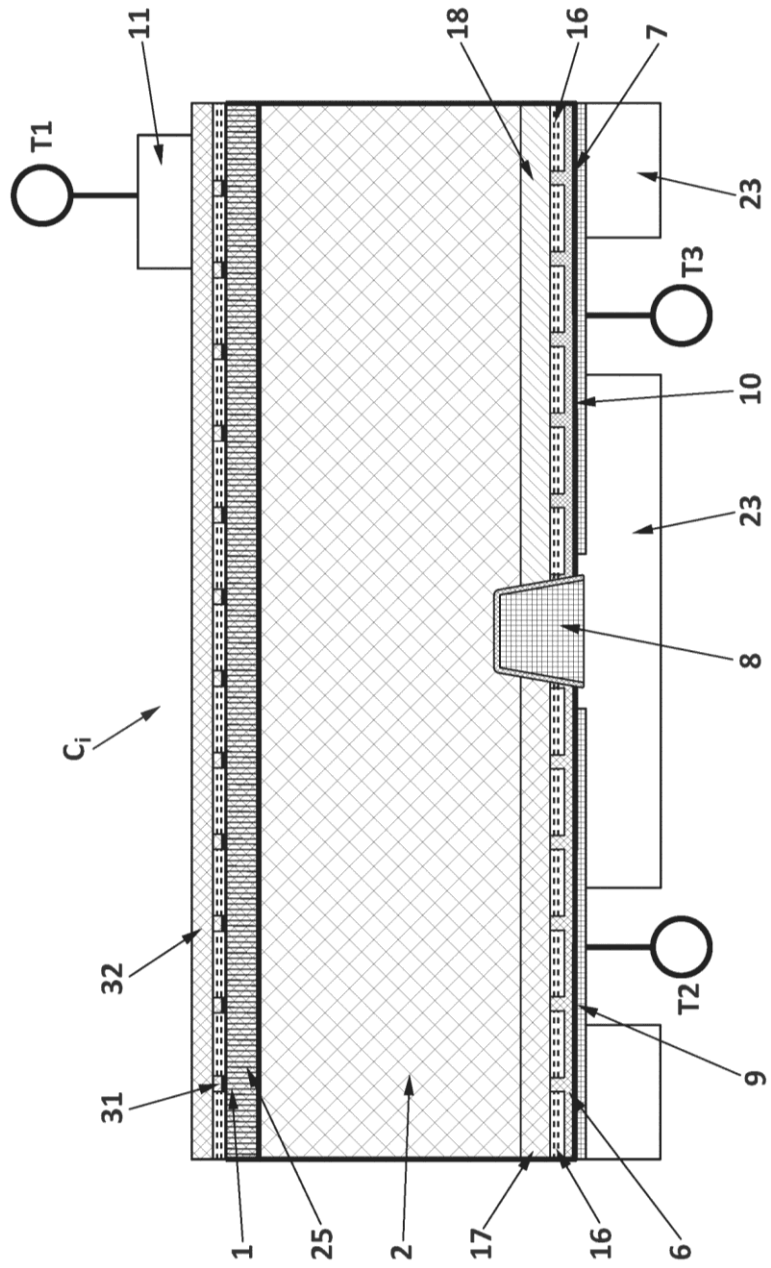


FIG. 10

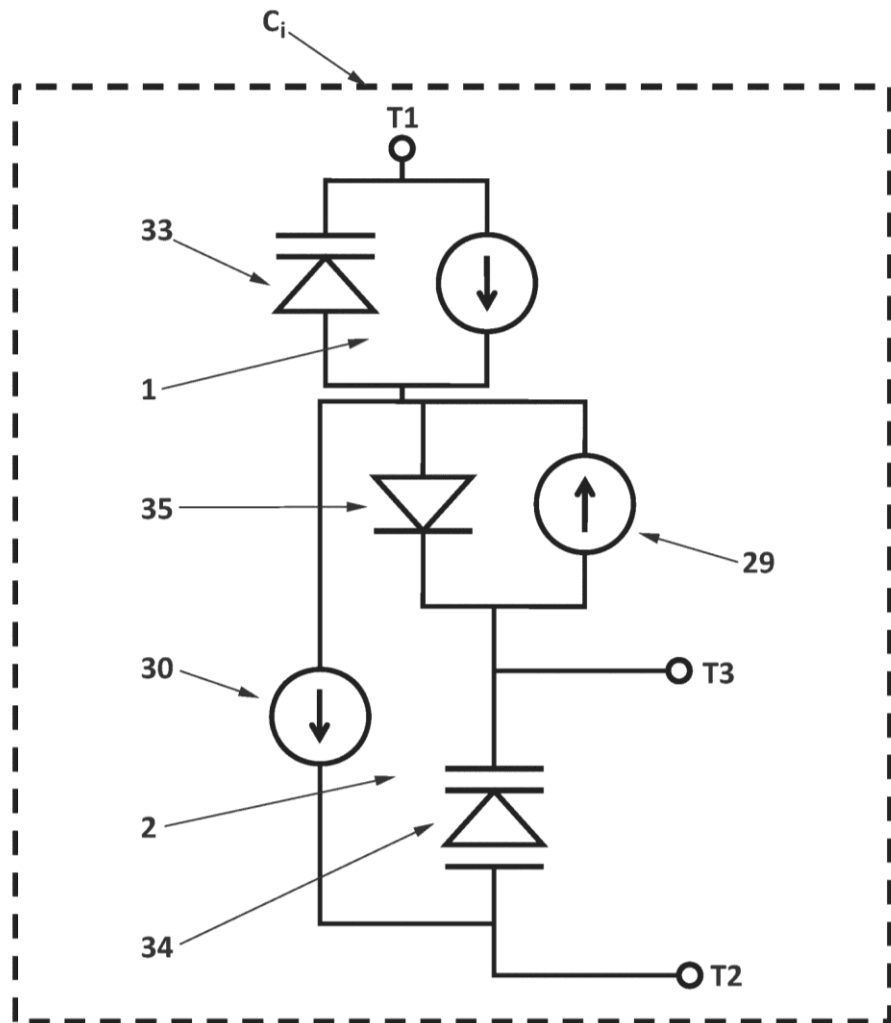


FIG. 11

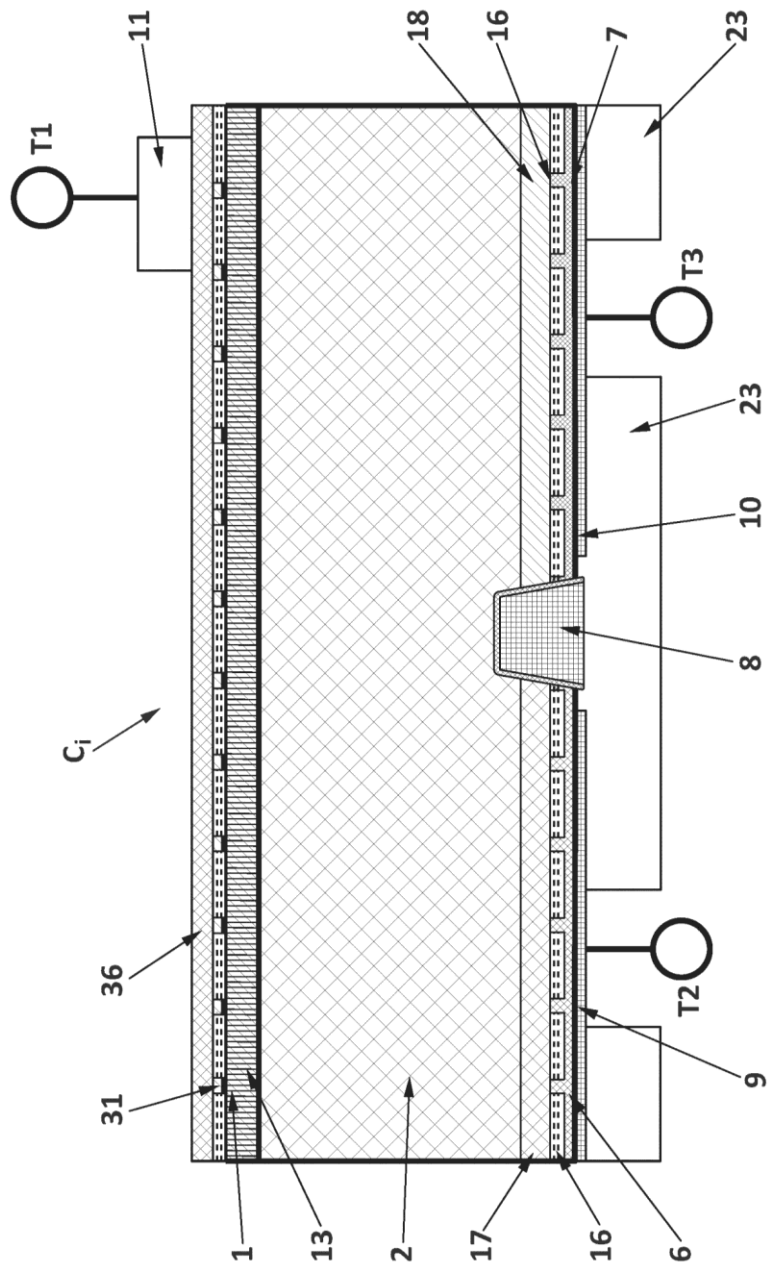


FIG. 12

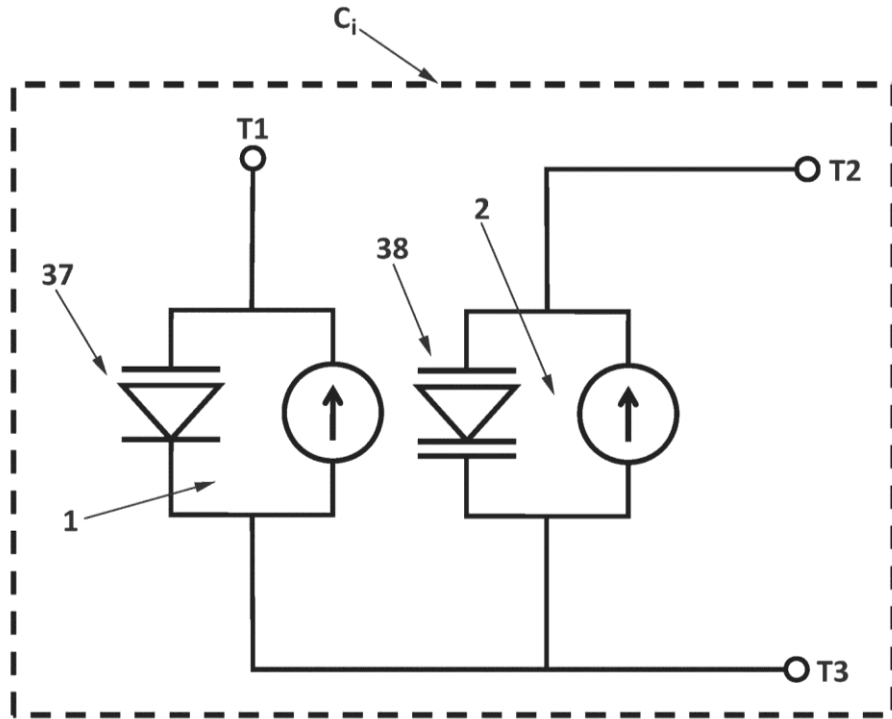


FIG. 13

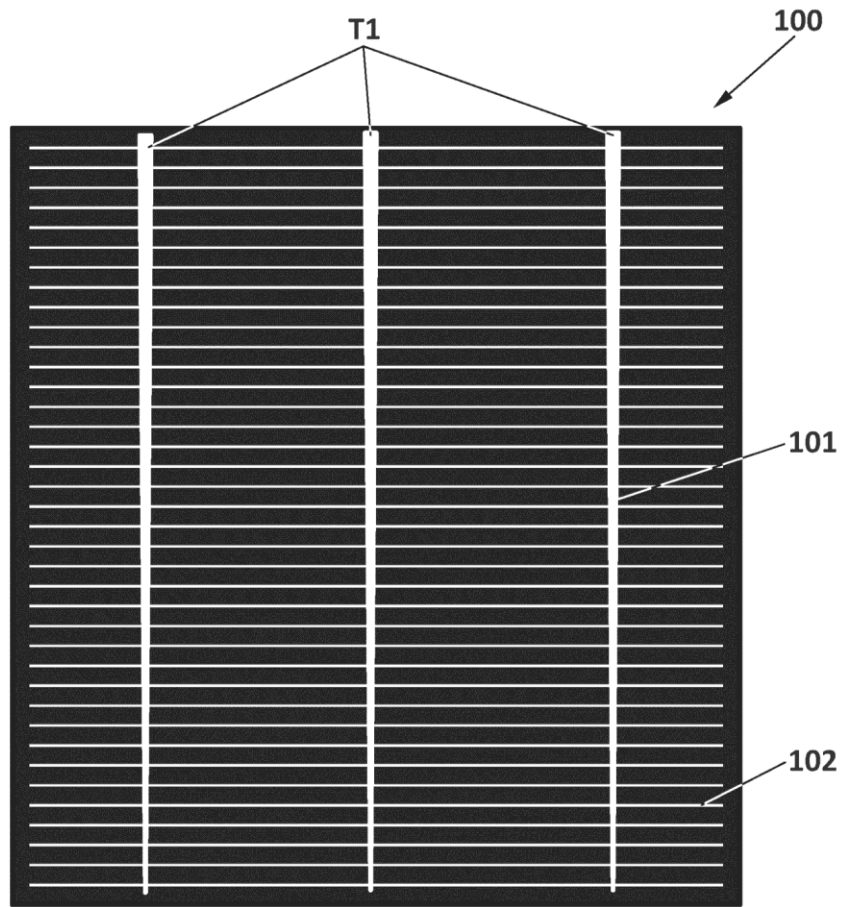


FIG. 14

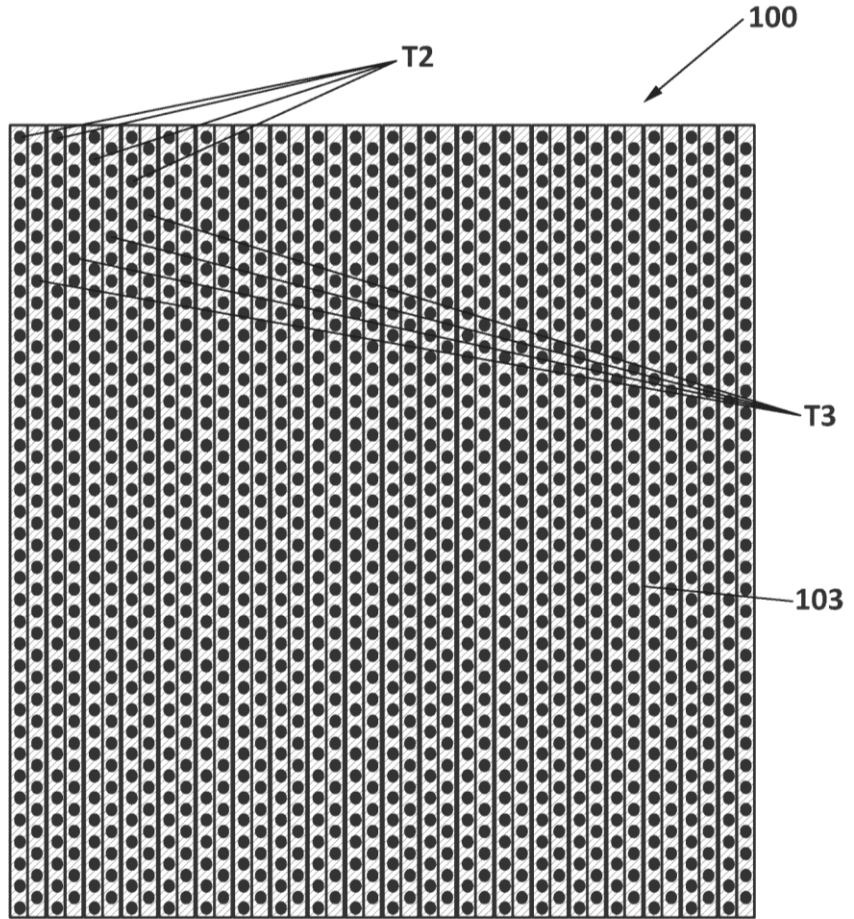


FIG. 15

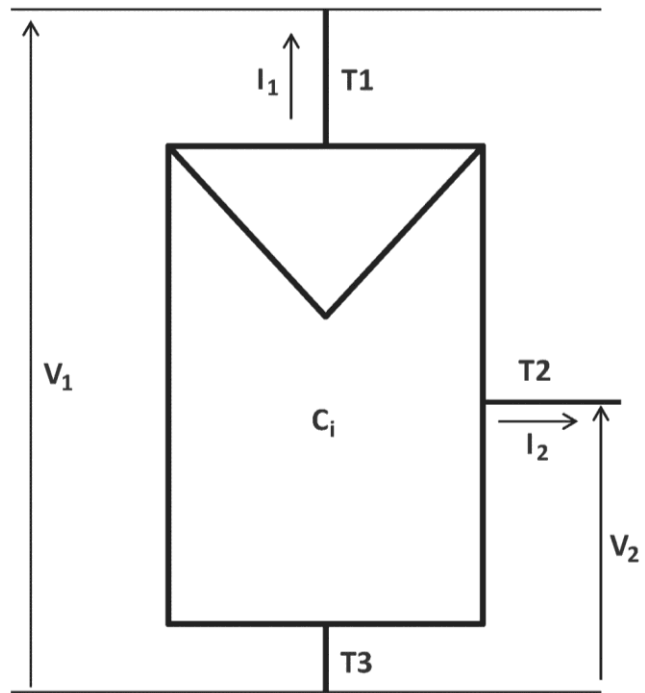


FIG. 16

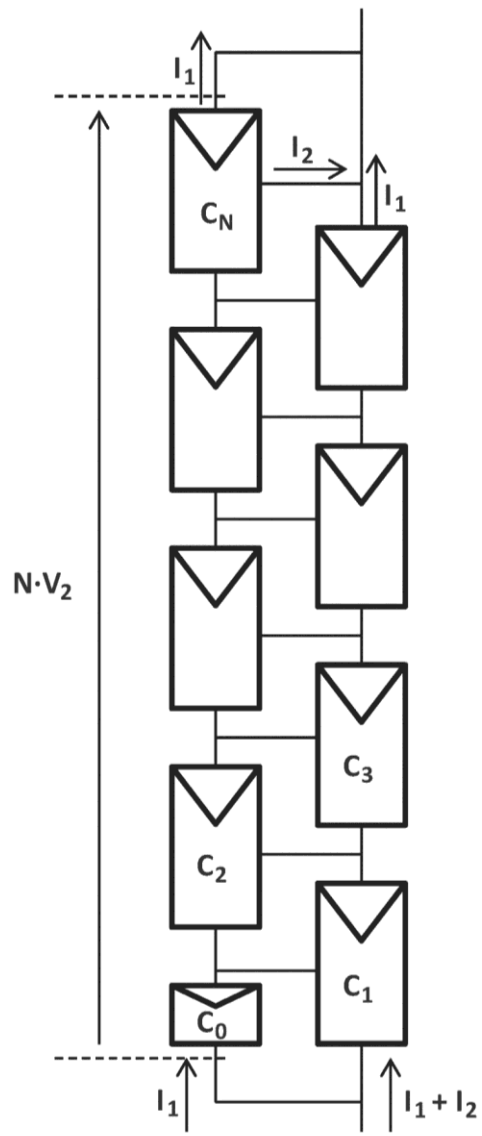


FIG. 17

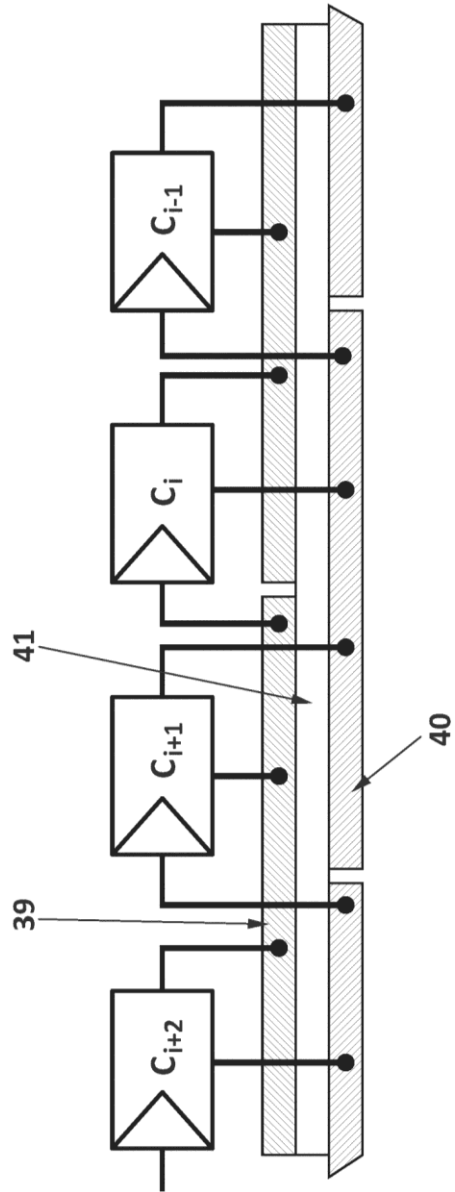


FIG. 18

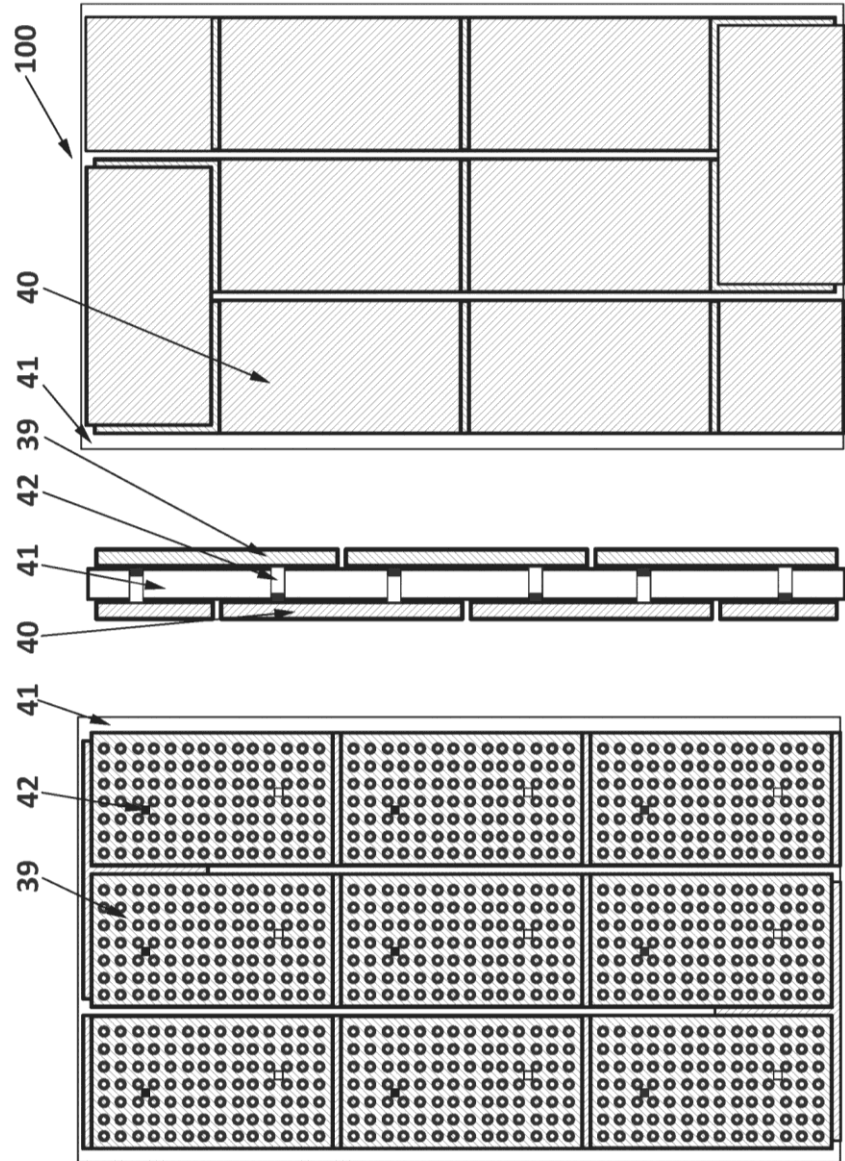


FIG. 19c

FIG. 19b

FIG. 19a

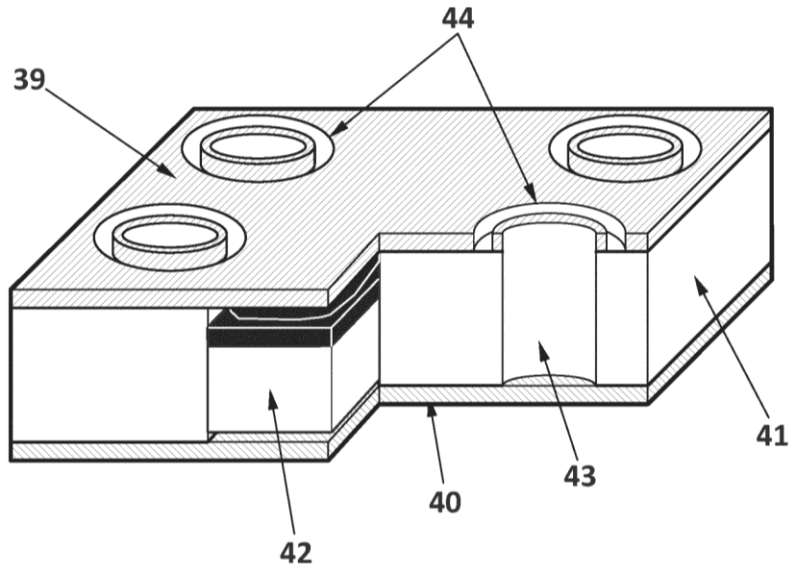


FIG. 20

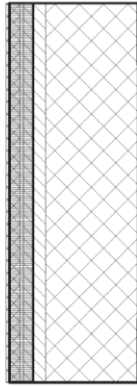


FIG. 21a

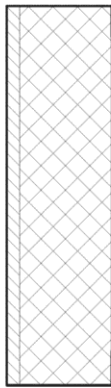


FIG. 21b

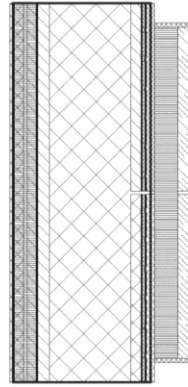


FIG. 21c

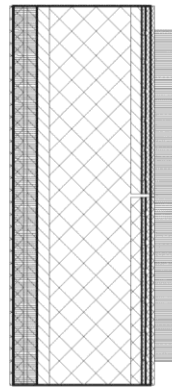


FIG. 21d

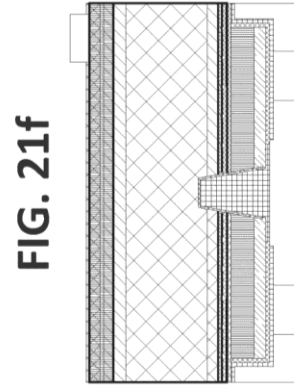


FIG. 21e

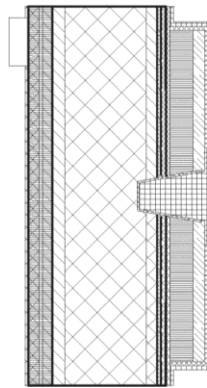


FIG. 21f

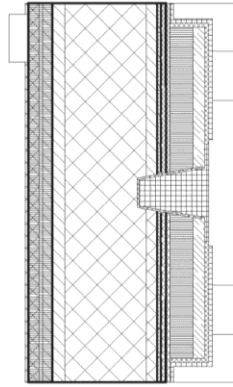


FIG. 21g