

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 733 723**

51 Int. Cl.:

**H01L 31/05** (2014.01)

**H01L 25/04** (2014.01)

**H01L 31/068** (2012.01)

**H01L 31/043** (2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.10.2010 PCT/ES2010/070661**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.04.2011 WO11045462**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.10.2010 E 10823096 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.03.2019 EP 2490267**

54 Título: **Dispositivo fotovoltaico y panel fotovoltaico**

30 Prioridad:

**14.10.2009 ES 200930844**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**02.12.2019**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO EUSKAL  
HERRIKO UNIBERTSITATEA (100.0%)  
Bº Sarriena s/n  
48940 Leioa (Vizcaya), ES**

72 Inventor/es:

**JIMENO CUESTA, JUAN CARLOS;  
LUQUE LÓPEZ, ANTONIO;  
REART BARAÑANO, FEDERICO;  
LAGO AURREKOETXEA, ROSA;  
GUTIÉRREZ SERRANO, RUBÉN;  
VARNER, KENNETH;  
IKARAN SALEGI, CARMEN;  
HERNANDO BRIONGOS, FERNANDO;  
SÁENZ NOVALES, MARÍA JOSÉ;  
EZQUERRA VENTOSA, JOSEBA;  
RODRÍGUEZ CUESTA, MARÍA VELIA;  
MARTÍNEZ SANTOS, VÍCTOR;  
URIARTE DEL RÍO, SUSANA;  
FANO LESTON, VANESA;  
AZKONA ESTEFANIA, NEKANE;  
CERECEDA MORIS, ENKO;  
MONTALBÁN FLOREZ, CRISTINA;  
HOCES FERNÁNDEZ, ITZIAR;  
PÉREZ MANSANO, LOURDES;  
OTAEGI AIZPEOLEA, ALOÑA;  
MARTÍN REAL, JORGE y  
FREIRE VELASCO, IRATXE**

74 Agente/Representante:

**CARPINTERO LÓPEZ, Mario**

ES 2 733 723 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Dispositivo fotovoltaico y panel fotovoltaico

**Campo técnico de la invención**

5 La invención se engloba en el campo de la energía solar fotovoltaica y, más específicamente, en el campo de los dispositivos fotovoltaicos tipo "tándem", es decir, dispositivos que comprenden una pluralidad de capas que presentan bandas prohibidas de energía con diferente anchura.

**Antecedentes de la invención**

10 Las células solares de silicio cristalino han dominado desde el comienzo el mercado del sector fotovoltaico y actualmente suponen entre el 80 y el 90 % de este. Las razones para el éxito de esta tecnología se basan en la abundancia y en el relativo bajo coste del silicio como material base para la fabricación de las células, en una eficiencia razonable y en una tecnología de fabricación muy estable y relativamente sencilla. Los módulos fotovoltaicos realizados con células de silicio son estables durante largos períodos de tiempo, y tanto los materiales como los procesos empleados en su fabricación son muy respetuosos con el medio ambiente.

15 Las células solares, fabricadas industrialmente para incluirlas en módulos solares fotovoltaicos de panel plano, normalmente presentan eficiencias de conversión de luz a electricidad del orden del 15 al 18 %, dependiendo de la calidad del material de partida empleado y de la complejidad del proceso de fabricación de la célula solar. En 1999, en la Universidad de Nueva Gales del Sur de Australia, UNSW, mediante el empleo de los mejores sustratos y procesos de fabricación complejos y muy cuidados, se obtuvieron células solares con eficiencias de hasta el 24,7 %. El uso bajo luz concentrada de las células solares permite aumentar la eficiencia de las células solares, básicamente porque, aunque la corriente de operación aumenta proporcionalmente al nivel de concentración, la tensión a la que opera la célula tiende también a aumentar ligeramente, lo que provoca que la potencia generada (IxV) aumente más que el nivel de la luz incidente. Para luz concentrada, la empresa americana AMONIX, con una célula de contactos posteriores desarrollada por la Universidad de Stanford, en EE. UU., ha conseguido una eficiencia del 27,6 % a una concentración de 92x.

25 La eficiencia es un parámetro clave en la reducción del coste de la energía solar fotovoltaica. Obtener más energía desde la misma superficie de colector fotovoltaico significa reducir los costes asociados al uso de materias primas, vidrios y aislamientos, soportes, cableado, terreno, instalación y mantenimiento, etc.

30 Las células o dispositivos denominados tándem o multiunión son unos de los mejores candidatos para la realización de conjuntos fotovoltaicos de eficiencia muy elevada. En estos dispositivos, se apilan diferentes capas o células solares hechas con diferentes materiales semiconductores que presentan diferentes anchuras de su banda prohibida. La anchura de la banda prohibida de un semiconductor determina la energía mínima de los fotones que pueden ser absorbidos por ese material, que aparecerá como transparente para fotones menos energéticos. También, la anchura de la banda prohibida está relacionada con la tensión a la que puede operar la célula solar, de manera que suelen obtenerse mayores tensiones a medida que aumenta esta anchura de la banda prohibida. En las células o dispositivos tándem, la célula con la banda prohibida de más anchura se sitúa en la parte superior de la estructura, la expuesta directamente a los rayos del sol, mientras que la célula con una menor anchura de banda prohibida se sitúa en la parte inferior. De esta manera, la célula superior absorbe los fotones más energéticos, siendo transparente al resto, que inciden sobre la siguiente estructura. El proceso se va repitiendo hasta que solo quedan aquellos fotones cuya energía es inferior a la mínima anchura de banda prohibida existente en el resto del conjunto tándem. Cada célula va conectada a las células más cercanas superior e inferior, uniendo el terminal negativo de una con el positivo de la otra, y viceversa. De esta manera, cada célula solar trabaja a una tensión diferente, siendo la tensión total de la célula tándem la suma de todas ellas, pero todas deben trabajar a la misma corriente, pues esta atraviesa toda la estructura tándem. Esta situación hace que las células tándem sean muy sensibles al espectro de la luz incidente y también al propio proceso de fabricación, pues la célula que produzca menor fotocorriente limitará la corriente entregada por todo el conjunto.

45 Las células tándem se han fabricado en función de materiales muy distintos, como las basadas en silicio amorfo y las de materiales II-VI o I-III-VI como, por ejemplo, CdSe sobre CIGS. Pero los materiales más desarrollados son los que se basan en semiconductores III-V. Con estos materiales se han creado recientemente células con eficiencias superiores al 40 %. Para estructuras con 4 niveles de semiconductor, se esperan eficiencias de conversión del orden del 50 %, estando el límite teórico por encima del 60 % para estructuras con un número ilimitado de capas de células solares.

De manera más específica, la solicitud de patente US5261969A se refiere a una célula fotovoltaica monolítica, de varias células y vinculada a la tensión y a un método de fabricación y, en particular, a una célula tándem monolítica de GaAs/Cu InSe<sub>2</sub>.

55 Un inconveniente de este tipo de dispositivos es su enorme complejidad. Por ejemplo, una célula de Fraunhofer-ISE con una eficiencia de 41,1 % a 454 soles de concentración, contiene un total de 19 capas semiconductoras. Además, este tipo de dispositivos frecuentemente usan germanio como material de soporte, algo que hace que sean muy caros y solo puedan ser empleados de una manera económicamente rentable en aplicaciones espaciales o en aplicaciones

terrestres con luz concentrada. En este sentido, ya se ha intentado sustituir la capa inferior de germanio por otra de silicio mucho más económica.

La evolución desde las actuales células de silicio hacia otras más eficientes, basadas en la estructura tándem descrita anteriormente, no es sencilla. Las células de silicio son capaces de producir una corriente fotogenerada en la banda de 34 a 41 mA/cm<sup>2</sup> de material. Por debajo de los 1,1 eV de energía, que el silicio es capaz de absorber, solo quedan en el espectro solar del orden de 20 mA/cm<sup>2</sup> que se podrían convertir en electricidad a unos valores razonables de tensión. Esto quiere decir que el diseño de una célula tándem con silicio y germanio en sus dos últimos niveles requeriría el empleo de una o dos células más en la parte superior de la estructura tándem, capaces de eliminar de la célula de silicio de 14 a 21 mA/cm<sup>2</sup> de fotones que no se pueden aprovechar en esta estructura y convertirse en electricidad a otras tensiones mayores.

Por lo tanto, el empleo de la estructura de célula tándem convencional, con conexión en serie de todos los niveles, requiere complejas estructuras para mejorar sustancialmente las características eléctricas de las actuales células de silicio.

La figura 1 muestra un ejemplo de un circuito equivalente de una estructura de célula fotovoltaica tándem según el estado de la técnica. Se puede considerar que lo que se llama célula tándem 100 en realidad es un dispositivo fotovoltaico compuesto por una pluralidad de células solares 101-103 (a veces llamadas "subcélulas", para diferenciarlas de la célula "global" 100) conectadas en serie y configuradas para recibir luz solar L. Cada una de dichas células solares corresponde a una capa de la estructura del dispositivo, y las células/capas están superpuestas de manera que, en un primer extremo (al que se suele denominar "extremo superior", puesto que es el extremo que, cuando el dispositivo está en uso, está situado para recibir la luz solar primero), hay una primera 101 de dichas capas, y en un segundo extremo, al que se suele denominar el "extremo inferior", hay una última 103 de dichas capas, pudiendo haber una o más capas intermedias 102. Por lo tanto, cada célula solar (101, 102, 103) corresponde a una de las capas de la estructura, y las células (capas) están conectadas en serie, tal y como se muestra en la figura 1.

Cada célula o capa está hecha con un material determinado, o combinación de materiales, (en la figura 1, m1, m2, m3) y está configurada para presentar una banda prohibida determinada, que varía entre las diferentes capas. La capa superior 101 presenta una banda prohibida más ancha (por ejemplo, en un caso habitual, del orden de 1,7 eV), la capa siguiente 102 presenta una banda prohibida menos ancha (por ejemplo, de 1,2 eV), etc., de manera que la banda prohibida menos ancha de todas (por ejemplo, de 0,7 eV) es la de la capa inferior 103. De esta manera, tal y como ya se sabe, cuando luz solar L incide sobre la estructura, los fotones atraviesan las diferentes bandas desde arriba hacia abajo y son "absorbidos" por las bandas según la energía de los fotones. De esta manera, la célula solar superior 101 absorbe los fotones cuya energía supera el ancho de su banda prohibida (y produce una energía correspondiente a dicha banda, "perdiéndose" al menos la diferencia entre la energía del fotón y el ancho de la banda prohibida de la capa), mientras que el resto de los fotones pasan a la capa siguiente, etc. Para maximizar la eficiencia del dispositivo fotovoltaico, es por lo tanto necesario, por una parte, configurarlo de manera que presente un número adecuado de capas y, por otra parte, garantizar que la distribución de los anchos de las bandas prohibidas de dichas capas sea adecuada en función del espectro energético de la luz solar.

Un problema que se deriva de la conexión en serie de las células fotovoltaicas o solares es que, mientras que cada célula opera a una tensión (U1, U2, U3) que es una función de, entre otras cosas, el ancho de su banda prohibida y de la intensidad y espectro de la luz, la corriente (I) a través de todas las células es la misma, de manera que la célula que menos corriente produce limita la corriente total del dispositivo, por lo que, por ejemplo, si una de las células solares 101 y 102 es capaz de producir una corriente muy elevada por absorber mucha energía solar, su capacidad de convertirla en energía eléctrica puede verse limitada por la corriente que produce otra de las capas, por ejemplo, la capa inferior 103. Esto supone una dificultad adicional en el momento de diseñar y producir dispositivos fotovoltaicos de tipo "tándem": no solo es necesario conseguir una estructura cuya distribución de bandas prohibidas sea óptima (o al menos buena) en función del espectro energético solar, sino que además es importante diseñar el dispositivo para que ninguna de las capas o células fotovoltaicas limiten en exceso el rendimiento de otra de las capas. Esto no solo dificulta el diseño, sino que también puede aumentar el coste del dispositivo, puesto que puede hacer necesario el uso de un gran número de capas y/o capas de materiales costosos.

Trupke y col., "Improved spectral robustness of triple tandem solar cells by combined series/parallel interconnection", *Journal of Applied Physics*, Vol. 96, nº4, 15/8/2004, describe una manera de intentar superar el problema que implica el hecho de que la corriente que atraviesa cada capa o célula del dispositivo tándem tiene que ser la misma. Se describen los problemas que suponen esta limitación de la corriente en una estructura de tres capas (conocida como célula solar tándem triple ("triple tandem solar cell"), y se propone como solución conectar en serie dos de las capas, las que tienen las banda prohibidas de menor anchura (en concreto, las dos capas inferiores), y luego conectar estas dos capas en paralelo con una capa con una banda prohibida de anchura mayor (en concreto, la capa superior). De esta manera, las capas inferiores no limitan la corriente que produce la capa superior, a la vez que se consigue una tensión aceptable (por ejemplo, la suma de la tensión de las dos capas inferiores). Se manifiesta que con esta disposición se prevé aumentar la eficiencia del dispositivo, aunque se comenta que también puede haber algunos problemas técnicos que deben solucionarse.

Es probable que la estructura propuesta por Trupke y col. efectivamente sirva para aumentar la eficiencia. Sin

embargo, también parece ser que tiene ciertas limitaciones. Para empezar, requiere al menos tres capas (las dos que se deben conectar en serie, y la tercera, la superior). Por otra parte, ya que es necesario conseguir que la tensión con la que opera el dispositivo sea la adecuada, también es necesario elegir bien los materiales para las diferentes capas, con el fin de optimizar, no solo las corrientes que se producen, sino también la tensión, algo que impone una limitación al diseñador de la estructura en cuanto a, por ejemplo, la elección de materiales. También puede ser que la interconexión entre capas pueda implicar ciertas dificultades debido a la particular combinación de conexiones paralelas y en serie.

**Descripción de la invención**

Por tanto, se ha considerado que sería de gran interés disponer de una estructura alternativa que igualmente pueda servir para aumentar la eficiencia con respecto a los dispositivos tándem convencionales, pero que ofrezca nuevas posibilidades de diseño del dispositivo, por ejemplo, que no requiera tres capas, que no requiera la conexión en serie entre capas y/o que permita nuevas combinaciones de materiales a la vez que se consiguen corrientes y tensiones adecuadas.

Un primer aspecto de la invención se refiere a un dispositivo fotovoltaico, que comprende una pluralidad de capas configuradas para convertir luz (L) en energía eléctrica, comprendiendo cada capa al menos una célula solar, estando cada capa configurada de manera que presente una banda prohibida con una anchura predeterminada, siendo la anchura de la banda prohibida de cada capa diferente de la anchura de la banda prohibida de las otras capas. De acuerdo con la invención, al menos una de dichas capas comprende al menos dos células solares conectadas en serie, teniendo dichas células solares conectadas en serie bandas prohibidas con la misma anchura. Además, las capas están conectadas entre sí en paralelo, de manera que la tensión sobre cada capa es la misma.

Dado que las capas están conectadas en paralelo, la corriente que produce una capa no está limitada por la corriente que producen las otras capas, algo que facilita el diseño de un dispositivo eficiente, con, por ejemplo, comparativamente pocas capas y/o materiales menos costosos.

A modo de ejemplo, se puede considerar el caso de un dispositivo tándem en el que una de las capas sea una célula de silicio cristalino (esta célula se podría realizar a partir de un sustrato de silicio, que sería el soporte mecánico de toda la estructura, lo que abarataría el coste del dispositivo total frente a otros que empleen, por ejemplo, germanio u otro material como soporte). Una célula solar de silicio puede llegar a producir del orden de 40 miliamperios de corriente por cada centímetro cuadrado de superficie expuesta a la luz en condiciones de iluminación estándar ("un sol"). Si se añadiese en la parte inferior de la célula de silicio otra célula solar de un material de banda prohibida menos ancha, germanio, por ejemplo, y se emplease una estructura tándem convencional, el dispositivo total podría llegar a producir una corriente eléctrica inferior a los 17 miliamperios por centímetro cuadrado. Esto se debe a que la fracción del espectro solar que es capaz de ser absorbida por una célula de germanio, pero no por una de silicio, a través de la cual ya se habría filtrado, está en este rango de valores. Por tanto, se desaprovecharía la corriente en exceso producida por la célula de silicio, los 23 miliamperios por centímetro cuadrado restantes. Para una realización eficiente de esta estructura, sería necesario incluir otro material en el extremo superior, capaz de convertir en electricidad al menos otros 17 miliamperios por centímetro cuadrado, correspondientes a los fotones más energéticos capaces de ser absorbidos por un material de mayor ancho de banda, originando un voltaje mayor que el de la célula de silicio. El conjunto podría comenzar por un material con un ancho de la banda prohibida de 1,7-1,8 eV, seguido de silicio y, por último, de germanio. Toda esta estructura se complicaría con todas las capas adicionales colocadas entre cada célula solar y que son necesarias para el correcto funcionamiento de la célula tándem según el estado de la técnica. Para que esta estructura sea eficiente, se necesitarían un mínimo de tres capas si es que las dos inferiores son de silicio y germanio.

Este problema queda resuelto con la invención. Por ejemplo, de acuerdo con una realización de la invención, se podría añadir la capa de germanio en la parte inferior de la célula de silicio, pero dividiendo la capa de germanio en dos células de áreas idénticas o parecidas conectadas en serie entre sí (de forma que cada una de estas dos células produzca una corriente aproximadamente igual que la que produce la otra). Por cada centímetro cuadrado del nuevo dispositivo, podrían llegar a obtenerse los 40 miliamperios correspondientes a la célula de silicio más otros 8,5 miliamperios de cada célula de germanio, obteniéndose una corriente total de 48,5 miliamperios, lo que supone una ganancia superior al 20 % en valor relativo con respecto a la célula original de silicio.

Con la estructura según el estado de la técnica (es decir, según el concepto ilustrado en la figura 1) se mantiene constante la corriente que circula a través de cada capa o célula individual y se suman las tensiones que producen cada célula. La corriente, que es el parámetro común, viene limitada por aquella estructura que proporciona una corriente menor que el resto. Con la estructura según la invención, el parámetro común a todas las capas es la tensión, obtenida como la suma de las tensiones de todas las células solares que vayan unidas en serie en la capa que menor tensión produce. No obstante, la corriente total del dispositivo se obtiene como suma de las corrientes de todas las capas. En el dispositivo según la invención, es la tensión de la peor capa la que limita el funcionamiento de todo el dispositivo. Con respecto al nivel de iluminación, bien sea referido para todo el espectro comprendido por la luz solar o para cada uno de los subespectros capaces de ser absorbidos por cada capa semiconductor, la corriente tiene un comportamiento lineal, siendo por tanto muy sensible a las variaciones del nivel luminoso o a los cambios de las componentes espectrales de la luz. Sin embargo, la tensión a la que operan las diferentes células varía de forma

logarítmica con el nivel de iluminación, lo que hace que este parámetro, la tensión, tenga una baja sensibilidad con respecto a la iluminación. Esta cualidad convierte a la estructura de la invención en una estructura mucho más robusta que la convencional por su mayor independencia en cuanto a sus características de funcionamiento con respecto a las posibles variaciones en el nivel luminoso, fundamentalmente de aquellas que alteran la distribución espectral de la luz.

Una de las capas puede ser de silicio, más concretamente, de silicio cristalino. Es decir, el dispositivo comprende células solares de silicio, algo que sirve para reducir el coste.

Otra de las capas puede ser de un material que comprenda germanio. Se ha comprobado que, debido a sus características, incluyendo la anchura de sus bandas prohibidas, la combinación de una capa de silicio y de una capa basada en germanio, por ejemplo, sustancialmente de germanio o de germanio-silicio, puede representar un equilibrio adecuado entre coste y eficiencia.

La capa de silicio comprende una célula solar con una cara superior y una cara inferior, y en dicha cara inferior pueden estar dispuestas dos (2) células solares del material que comprende germanio, conectadas en serie. Se ha comprobado que la relación de 1:2 entre las células de silicio y las células de germanio o germanio-silicio puede ser óptima: permite producir una corriente aceptable a una tensión aceptable; si se hubiera usado solo una célula de germanio por célula de silicio, la célula de germanio produciría más corriente (por tener una mayor superficie) pero bajaría la tensión, algo que afectaría negativamente a la aportación de la célula de silicio a la potencia total producida por el dispositivo, produciendo una eficiencia peor que la que se consigue con la relación de 1:2.

De acuerdo con una posible realización de la invención, una segunda de las capas puede ser una capa de silicio que comprenda una pluralidad de segundas células solares conectadas en serie, una tercera de las capas puede ser una capa de un material que comprenda germanio, comprendiendo dicha tercera de las capas una pluralidad de terceras células solares conectadas en serie, de manera que en una cara inferior de cada una de las segundas células solares hay dispuestas, al menos, dos de las terceras células solares conectadas en serie. Además, una capa adicional, en concreto, una primera de las capas puede estar dispuesta sobre una cara superior de la segunda de las capas y comprender al menos una célula solar que tenga una banda prohibida más ancha que la banda prohibida de silicio.

El material que comprende germanio puede ser, por ejemplo, germanio o germanio-silicio.

Cuando el dispositivo de la invención comprende una capa de silicio, la capa de silicio puede ser una capa de soporte de la pluralidad de capas. Dado que la capa de soporte tiene que cumplir con la función de "soporte", en general, comprende más material que las otras capas, por lo que poder fabricarla a partir de silicio puede suponer una reducción de los costes.

De acuerdo con la invención, al menos una de las capas comprende al menos una célula solar de silicio con contactos en la cara inferior, estando depositadas sobre dicha cara inferior al menos dos células solares de germanio o de germanio-silicio conectadas en serie.

Otro aspecto de la invención se refiere a un panel fotovoltaico o panel solar, que comprende una pluralidad de los dispositivos fotovoltaicos según la invención.

### **Descripción de los dibujos**

Para complementar la descripción y con el fin de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con una realización práctica preferida de esta, se adjunta como parte integrante de la descripción un juego de figuras en el que, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La figura 1 muestra un ejemplo de un circuito equivalente de una estructura de dispositivo fotovoltaico tándem según el estado de la técnica.

La figura 2 muestra un ejemplo de un circuito equivalente de una estructura de dispositivo fotovoltaico tándem según una posible realización de la presente invención.

La figura 3 muestra los diferentes coeficientes de absorción del silicio y del germanio.

La figura 4 muestra las diferentes partes del espectro solar que se absorberían por cada una de las células solares.

La figura 5 muestra una vista esquemática en perspectiva de una célula fotovoltaica de silicio con contactos posteriores.

La figura 6 muestra una vista esquemática en perspectiva de la misma célula fotovoltaica de silicio con dos células de germanio superpuestas en su cara inferior.

La figura 7 muestra una sección transversal de una estructura similar a la de la figura 6.

### **Realizaciones preferentes de la invención**

La figura 2 muestra cómo un dispositivo fotovoltaico de acuerdo con la invención puede comprender dos o más capas (11, 12, 13) configuradas para convertir la luz L en energía eléctrica. Cada capa comprende al menos una célula solar, y cada capa está configurada de manera que presenta una banda prohibida con una anchura predeterminada, siendo la anchura de la banda prohibida de cada capa diferente de la anchura de la banda prohibida de las otras capas. Al

menos una de las capas (12, 13) comprende al menos dos células solares (12A, 12B; 13A, 13B, 13C, 13D) conectadas en serie, y las capas están conectadas entre sí en paralelo, de manera que la tensión  $U$  sobre cada capa (11, 12, 13) es la misma. Tal y como se puede ver, por cada capa fluye una corriente diferente ( $I_{11}$ ,  $I_{12}$ ,  $I_{13}$ ), de manera que el dispositivo produce una corriente total que es la suma ( $I_{11}+I_{12}+I_{13}$ ) de las corrientes producidas por cada capa.

- 5 En una realización habitual, el dispositivo puede comprender dos capas, por ejemplo, una capa de silicio cristalino, con una o más células solares en serie, y otra capa de germanio o silicio-germanio, dispuesta sobre la cara inferior de la capa anterior, de manera que en la superficie "inferior" de cada célula solar de silicio hay dos o más células de germanio conectadas en serie. También existe la posibilidad de que sobre la capa de silicio haya depositada otra capa con una banda prohibida superior a la de silicio (por ejemplo, una banda prohibida superior a 2 eV), en cuyo caso  
10 puede haber dos o más células solares de silicio dispuestas en cada célula solar de la capa superior. Según la invención, el soporte de la estructura es la capa de silicio (entre otras cosas, porque es un material relativamente barato, por lo que el hecho de que constituya una gran parte del material total del dispositivo puede servir para reducir su coste), y hay una capa de germanio o de silicio-germanio dispuesta sobre la superficie inferior de la capa de silicio, de acuerdo con la estructura descrita, es decir, con dos o más células fotovoltaicas de germanio o de germanio-silicio  
15 dispuestas sobre la cara inferior de cada célula fotovoltaica de silicio, algo que proporciona una eficiencia buena a un coste aceptable. Lógicamente, esta estructura puede completarse con capas adicionales, aumentando la eficiencia total del dispositivo, pero también, como es lógico, aumentando su complejidad y, en muchos casos, su coste.

Tal y como se ha indicado, para las células de anchura de banda inferior a la de silicio, se puede usar germanio o silicio-germanio, cuya anchura de banda prohibida puede modularse en el rango de las 0,65 a 1,1 eV, dependiendo  
20 tanto de la relación de silicio a germanio como de la presión de la red cristalina. La figura 3 muestra los diferentes coeficientes de absorción del silicio y del germanio. Por encima de los 1000 nm casi toda la luz solar se absorbe en las células de germanio o silicio-germanio, siendo suficiente que los espesores de esta célula sean pequeños, inferiores a los 5 micrómetros, para reunir la mayor parte del espectro infrarrojo. La figura 4 muestra las diferentes partes del espectro solar que serían absorbidas por cada una de las células solares.

- 25 En el caso de que la célula de silicio sea una célula de contactos posteriores, tanto la estructura de la célula como su fabricación resultan sencillas. La figura 5 muestra de forma esquemática una célula fotovoltaica 11A de silicio, en perspectiva y con su cara inferior (es decir, la que no recibe la luz solar  $L$ ) hacia arriba. Se pueden ver el emisor positivo 21, el emisor negativo 22, el electrodo positivo 23 y el electrodo negativo 24. En la figura 6 se puede observar la estructura de dos capas, en la que, en la capa de silicio, que puede formar el soporte de la estructura, se han  
30 superpuesto dos células fotovoltaicas 12A y 12B de germanio (o germanio-silicio), conectadas en serie a través del electrodo 25 y conectadas en paralelo con la célula fotovoltaica de silicio 11A a través de los contactos posteriores 23 y 24.

La figura 7 ilustra esquemáticamente una sección transversal de una estructura similar a la de la figura 6, donde  
35 elementos similares llevan las mismas referencias numéricas. La parte superior de la célula fotovoltaica tiene una configuración particular habitual de las del tipo TWT, descritas en el documento WO-A-2006/051132, pero podría ser cualquier otra: no es una característica esencial para la invención. Se puede ver el emisor frontal 26 (de tipo n o p) y el emisor positivo 21 y negativo 22, así como los correspondientes emisores negativo 28 y positivo 29 de las células de germanio, que están conectadas en serie a través del electrodo 25.

Es decir, la capa de germanio está dividida en pequeñas porciones, cubriendo cada una la región tipo n o la tipo p,  
40 correspondientes a la estructura interdigitada de la cara posterior de la célula de silicio. Los emisores tipo n y p de las caras frontales de las células  $n^+p$  y  $p^+p$ , o  $n^+n$  y  $p^+n$  si el germanio es germanio dopado tipo n, podrían formarse a partir de los existentes en la cara posterior de la célula de silicio, mediante la difusión de estos. Un emisor 30 puede ser necesario en la cara posterior de una de las células de germanio a fin de completar la estructura  $p^+pn^+$  o  $n^+np^+$ , dependiendo del tipo de germanio depositado. Una capa metálica 25 se deposita uniendo las caras posteriores de  
45 ambas células de germanio a fin de conectar en serie las estructuras  $n^+p$  y  $p^+pn^+$ , o  $n^+np^+$  y  $p^+n$  si el germanio es germanio dopado tipo n. Por último, podría ser necesario un aislante 27 entre las células de silicio y germanio podría ser necesario a fin de separar los pseudoniveles de Fermi de ambas estructuras.

En el caso de una célula de tres niveles se podrían depositar capas semiconductoras en la cara frontal de la célula de silicio. Estas capas podrían tener una anchura de la banda prohibida del orden de 2 eV o superior, por ejemplo, de  
50 1,7 eV o superior, y su tensión de trabajo, en un caso normal, podría ser de entre 1 y 1,2 voltios. La célula de silicio, sustrato de la de germanio, se podría dividir en dos, y cada mitad deberá conectarse en serie. La célula resultante deberá conectarse en paralelo con la célula superior. Es decir, se correspondería con la estructura ilustrada en la figura 2, siendo las células de la capa 12 las de silicio y las de la capa 13 las de germanio o germanio-silicio. También se correspondería con la de la figura 6, siendo las células 12A y 12B las de silicio y la célula 11A la de la capa superior  
55 (y no viéndose las células de germanio, que se superpondrían a las de silicio).

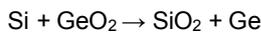
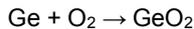
Para una estructura con dos niveles, el primero de silicio y el segundo de germanio o de silicio-germanio, la célula de germanio podría llegar a reunir hasta 17 mA/cm<sup>2</sup>, no aprovechables por la célula de silicio. Como esta célula se encuentra dividida en dos mitades, luego conectadas en serie, la estructura de germanio podría llegar a reunir hasta  
60 8,5 mA/cm<sup>2</sup> y fácilmente más de 6 mA/cm<sup>2</sup>. Estas cifras suponen una mejora del 12 al 20 % con respecto a la célula de silicio usada como soporte. Teniendo en cuenta que es posible fabricar células de silicio con eficiencias de hasta

el 24,7 % medidas a 1 sol, la nueva estructura de dos niveles podría representar una eficiencia tecnológicamente alcanzable en la banda del 27 al 30 %. Para una estructura con tres niveles, podrían obtenerse unos 10 mA/cm<sup>2</sup> de los antes reunidos por la célula de silicio a una tensión doble. La eficiencia alcanzable de esta estructura sería del 32 al 36 % en la banda.

- 5 A continuación, se considera, a modo de ejemplo, la estructura básica de dos niveles, en concreto, un nivel superior, que es una célula de silicio de contactos posteriores, y un nivel inferior, que es un conjunto en serie de dos células de germanio, tal y como se puede ver, por ejemplo, en las figuras 6 y 7.

La célula superior de silicio puede tener una estructura posterior interdigitada, que podrá ser del tipo IBC o PCSC o EWT o TWT (véase el documento WO-A-2006/051132) o de cualquier otra similar, cuyo proceso de fabricación está bien descrito en la literatura. Esta célula puede estar ya provista de las pestañas metálicas 23 y 24, pues estas quedan al menos parcialmente enterradas debajo de la capa de germanio depositada. Sobre la parte posterior de la célula se puede depositar una capa de germanio de un espesor de entre 1 y 5 micrómetros. Esta capa se puede depositar mediante deposición química en fase de vapor, CVD, a partir de GeH<sub>4</sub> u otros compuestos clorados, como GeH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, haciéndolos reaccionar con SiH<sub>4</sub> o SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> en un ambiente de hidrógeno, por lo general, a baja presión. Debido a la gran diferencia de constantes de red entre el silicio y el germanio, 4,2 %, puede ser preciso emplear técnicas especiales a fin de evitar la aparición de dislocaciones cuando, para espesores suficientes, la red del germanio se relaje a su tamaño de equilibrio. Una técnica usual consiste en depositar una fina capa de Ge a temperaturas en el rango de 300 a 350°, seguida de otra capa, ya gruesa, depositada a más de 600°, finalizando el proceso con un recocido de toda la estructura. La capa de germanio puede depositarse sobre toda la superficie posterior de la oblea y, posteriormente, ser delineada mediante ataque químico o ablación por láser, o también se puede depositar selectivamente usando una fina capa de SiGe como semilla. En este caso, podría evitarse el proceso de deposición en dos temperaturas descrito anteriormente.

25 Bien durante la deposición de la capa de germanio, bien al final de esta, un proceso de oxidación en ambiente de oxígeno o de vapor de agua podrá crear la capa de óxido de silicio necesaria para el aislamiento de las células de silicio y de germanio, utilizando para esto la reacción química:



30 En la bibliografía, también se puede encontrar tecnología para la deposición de germanio epitaxial sobre finas capas de óxido de silicio. Actualmente hay un gran interés en tecnologías de deposición de germanio y de silicio-germanio para la fabricación de transistores bipolares de alta velocidad y para fotodetectores, por lo que existe mucha tecnología desarrollada para estos fines.

35 De las dos células de germanio resultantes, al menos una de ellas puede necesitar de una difusión en su cara posterior, un tipo p si el germanio depositado es tipo n, o viceversa. Esta difusión puede realizarse bien mediante técnicas convencionales de enmascarado, apertura de ventanas y difusión en horno o bien mediante un dopado selectivo usando deposición serigráfica del dopante. La metalización, realizada bien en un gran vacío o por serigrafía, unirá eléctricamente ambas estructuras de germanio.

En este texto, la palabra "comprende" y sus variantes (como "comprendiendo", etc.) no deben interpretarse de forma excluyente, es decir, no excluyen la posibilidad de que lo descrito incluya otros elementos, etapas, etc.

40 Por otra parte, la invención no está limitada a las realizaciones concretas que se han descrito, sino que también abarca, por ejemplo, las variantes que pueden ser realizadas por un experto habitual en la materia (por ejemplo, en cuanto a la elección de materiales, dimensiones, componentes, configuración, etc.) dentro del alcance de la invención, que se define en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Dispositivo fotovoltaico, que comprende una pluralidad de capas (11, 12, 13) configuradas para convertir luz (L) en energía eléctrica, comprendiendo cada capa al menos una célula solar (11A; 12A, 12B; 13A, 13B, 13C, 13D), estando cada capa configurada de manera que presenta una banda prohibida con una anchura predeterminada, siendo la anchura de la banda prohibida de cada capa (11, 12, 13) diferente de la anchura de la banda prohibida de las otras capas (11, 12, 13), en el que al menos una de dichas capas (12, 13) comprende al menos dos células solares (12A, 12B; 13A, 13B, 13C, 13D) conectadas en serie, teniendo dichas células solares conectadas en serie bandas prohibidas con la misma anchura; y en el que las capas están conectadas entre sí en paralelo, de manera que la tensión (U) sobre cada capa (11, 12, 13) es la misma,
- 5
- 10 **caracterizado porque** al menos una de dichas capas (11) es una capa de silicio que es una capa de soporte de la pluralidad de capas (11, 12, 13), comprendiendo dicha capa (11) de silicio:
- al menos una célula solar de silicio (11A) con una cara superior y una cara inferior, comprendiendo dicha capa (11) de silicio contactos inferiores (23, 24) en la cara inferior, en la que otra de dichas capas (12) comprende bien dos células solares de germanio (12A, 12B) o bien dos células solares de germanio-silicio (12A, 12B),
- 15 depositadas sobre dicha cara inferior y conectadas en serie, y también conectadas en paralelo con la célula solar de silicio (11A) a través de los contactos inferiores (23, 24) de la capa (11) de silicio.
2. Dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 1, en el que las al menos dos células solares de germanio o germanio-silicio (12A, 12B) son células solares de germanio.
3. Dispositivo fotovoltaico según la reivindicación 1, en el que las al menos dos células solares de germanio o germanio-silicio (12A, 12B) son células solares de germanio-silicio.
- 20
4. Panel fotovoltaico que comprende una pluralidad de dispositivos fotovoltaicos según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

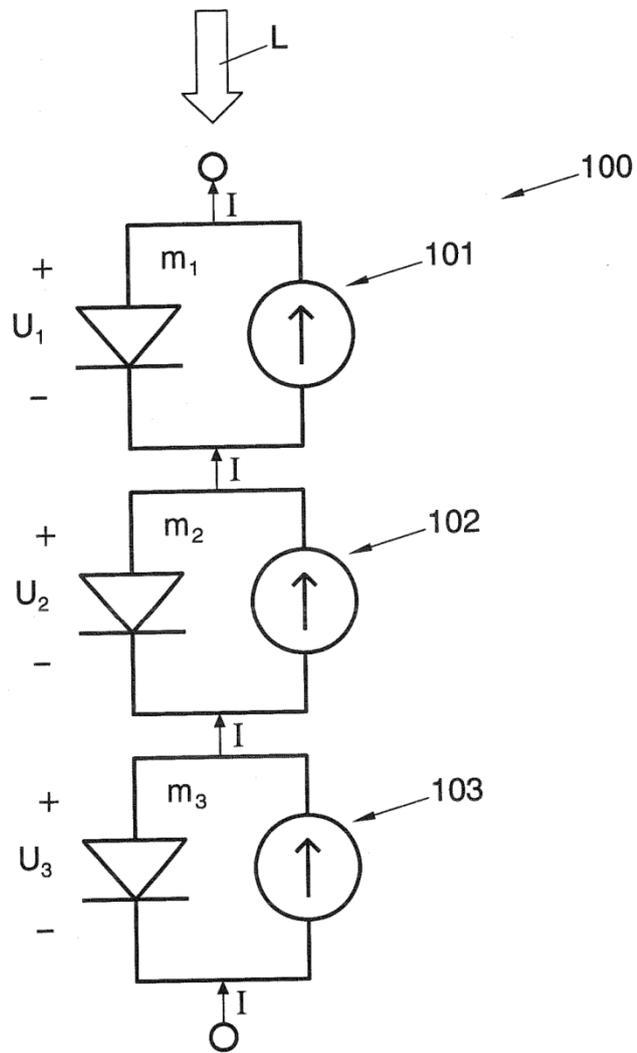


FIG. 1

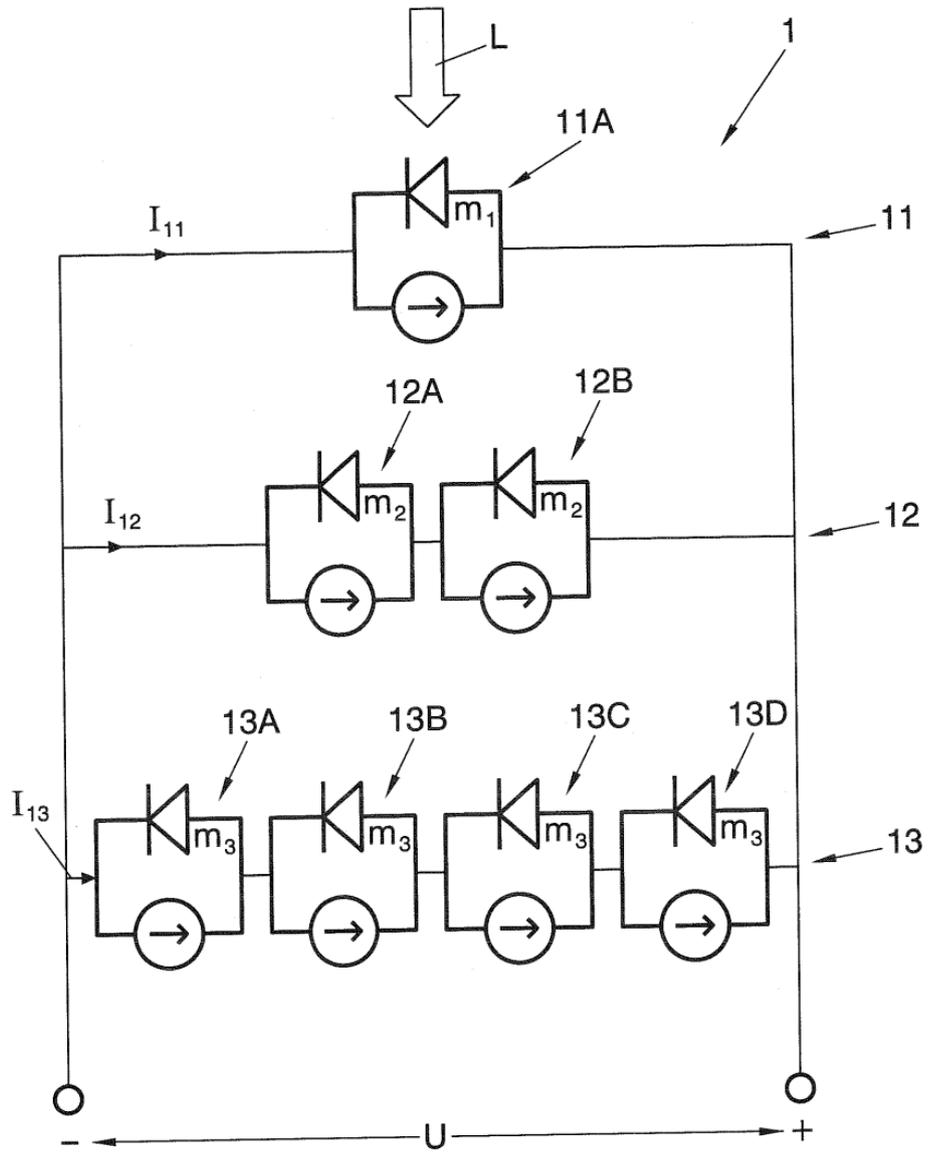


FIG. 2

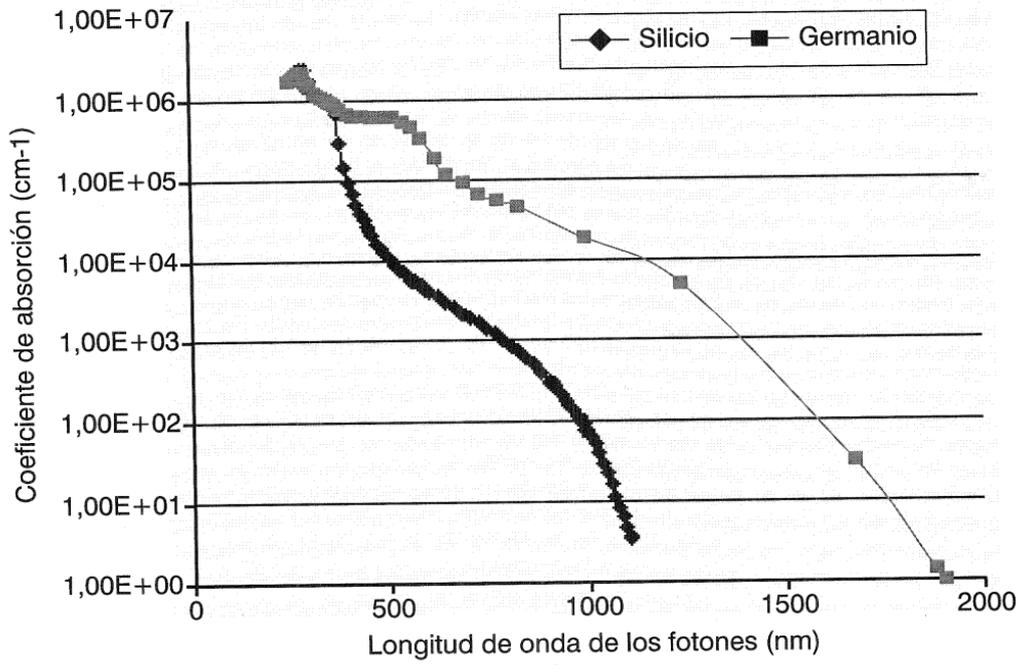


FIG. 3

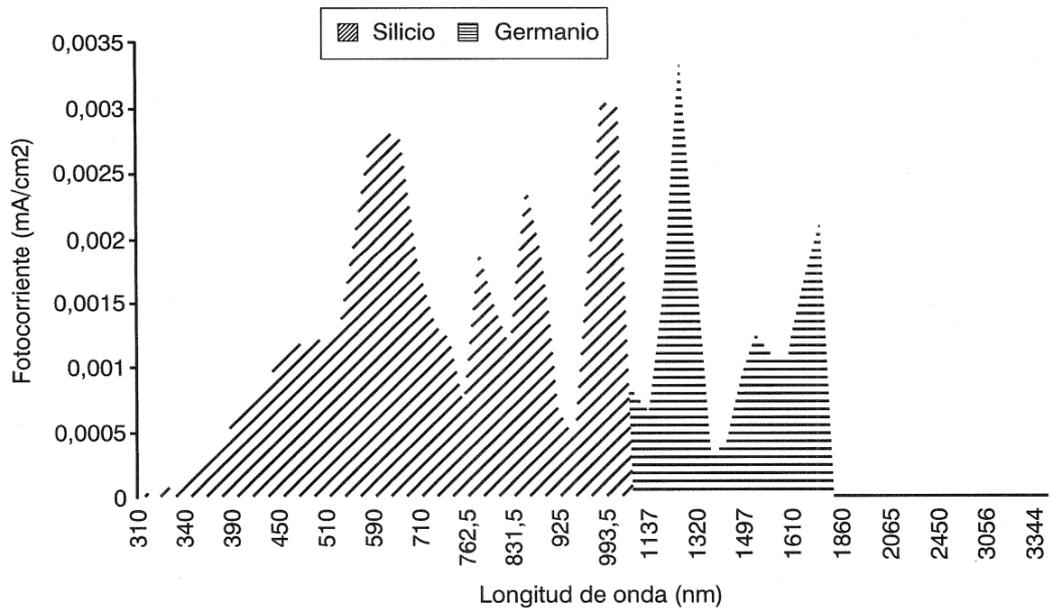


FIG. 4

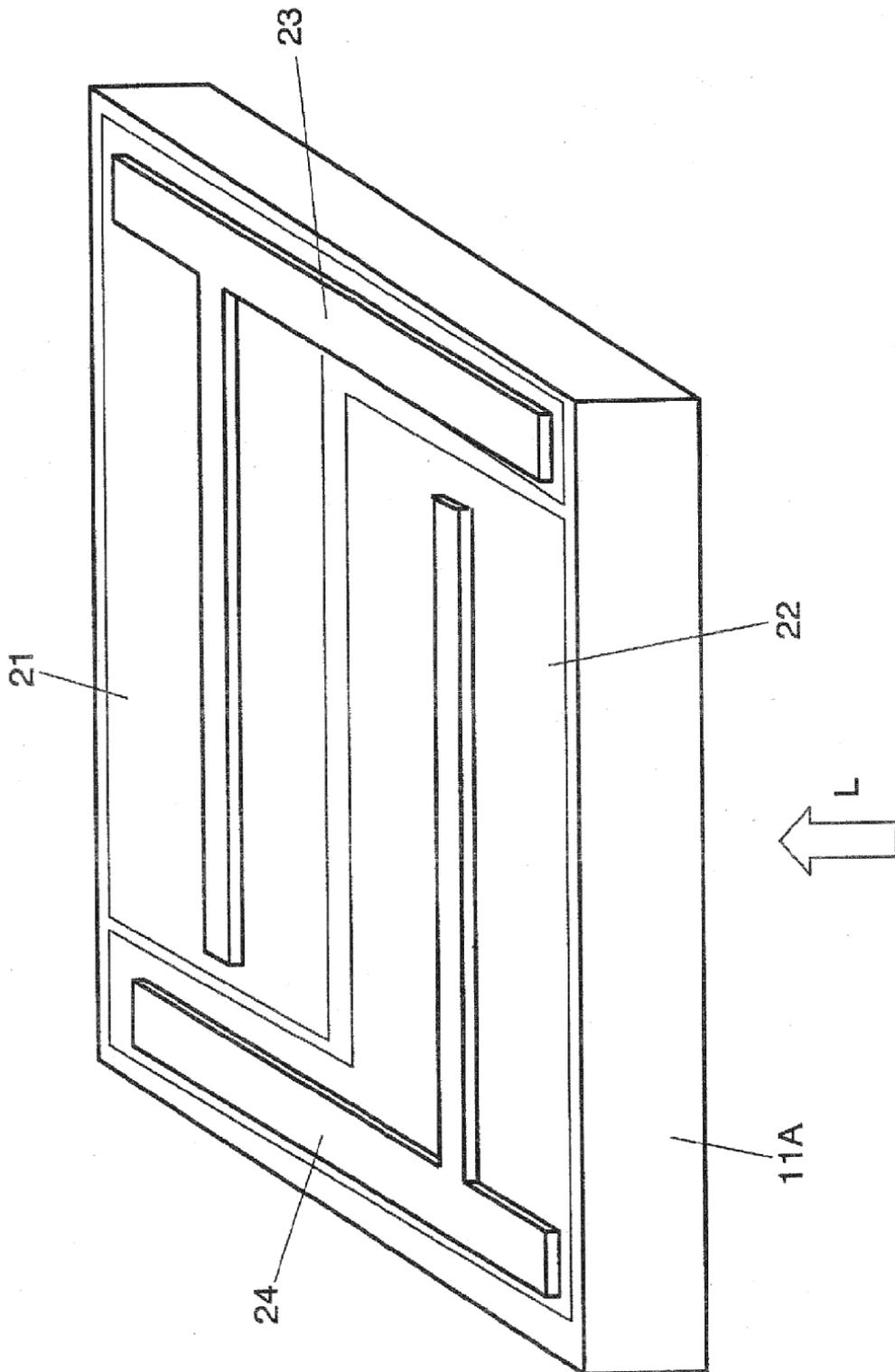


FIG. 5

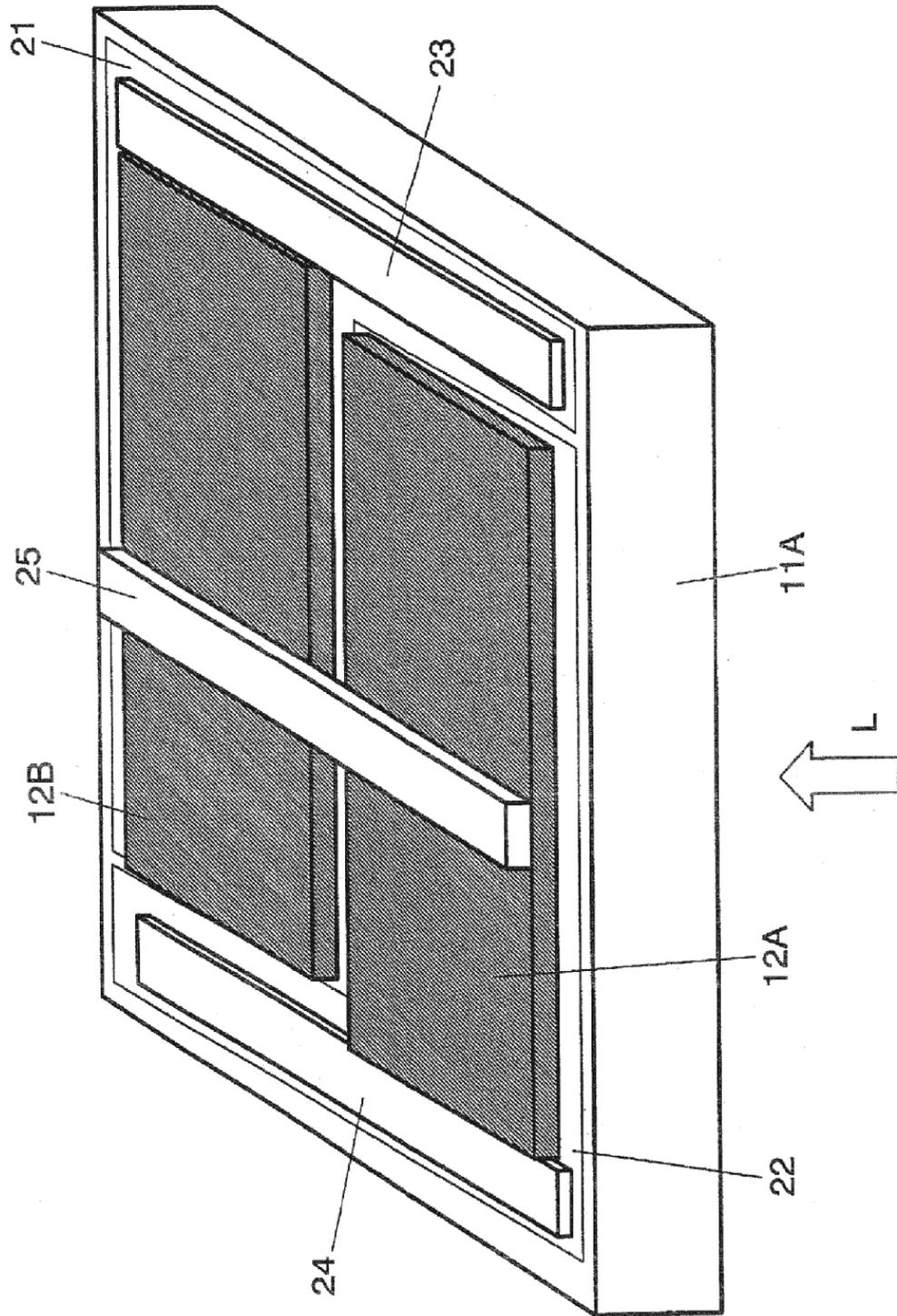


FIG. 6

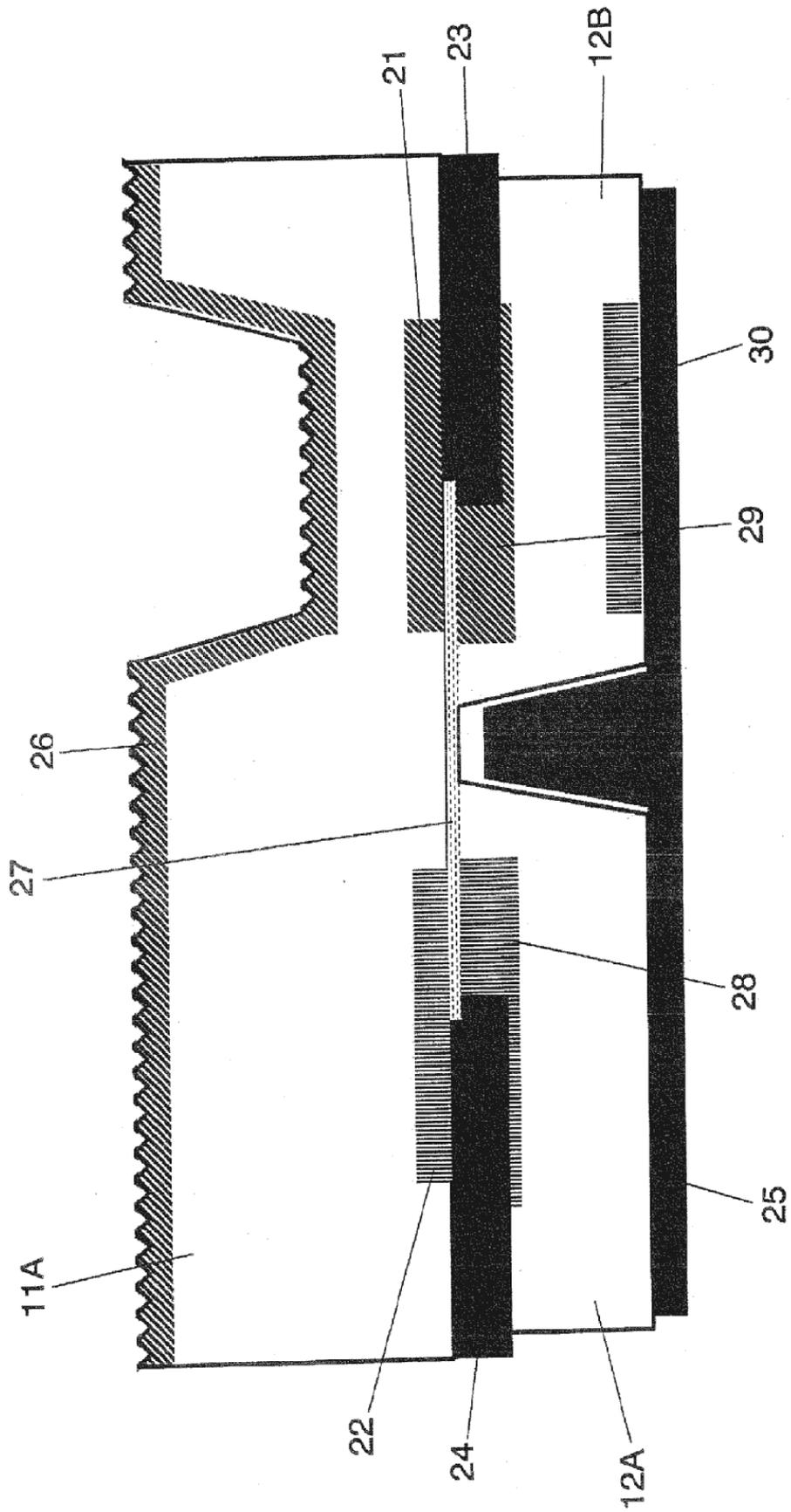


FIG. 7