

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 620 092**

51 Int. Cl.:

H01L 31/075 (2012.01)

H01L 31/18 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **23.04.2008 PCT/EP2008/054896**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.11.2008 WO08132104**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **23.04.2008 E 08736480 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.01.2017 EP 2137771**

54 Título: **Módulo fotovoltaico que comprende una capa con puntos de conducción**

30 Prioridad:

26.04.2007 EP 07107029

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

27.06.2017

73 Titular/es:

**HYET ENERGY SYSTEMS B.V. (100.0%)
Westervoortsedijk 71 K
6827 AV Arnhem, NL**

72 Inventor/es:

**DUBBELDAM, GERRIT CORNELIS y
SPORTEL, EDWIN PETER**

74 Agente/Representante:

ARIAS SANZ, Juan

ES 2 620 092 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

Módulo fotovoltaico que comprende una capa con puntos de conducción

5 La invención se refiere a un módulo fotovoltaico (PV) que comprende una pluralidad de células, conteniendo cada célula un sustrato, una capa conductora transparente, una capa fotovoltaica y una capa de electrodo trasera, donde la capa fotovoltaica comprende al menos una capa de silicio p-i-n o n-i-p, y a un método de fabricación de dicho módulo fotovoltaico.

10 Cuando un módulo fotovoltaico formado por muchas células conectadas en serie es sombreado en parte, las células iluminadas pueden causar una fuerte tensión negativa (inversa) sobre las células sombreadas. Este es particularmente el caso cuando las células sombreadas tienen una alta resistencia en paralelo. Debido a que no se genera corriente en las células sombreadas, la corriente de módulo es casi cero de manera que las células sombreadas están expuestas a la tensión del circuito abierto de las células iluminadas. Con los sistemas de gran tamaño, tal tensión puede ser muy alta de forma que la tensión de ruptura se transmite fácilmente. En las células sombreadas puede ocurrir una fuerte producción de calor local (punto caliente) que puede dar lugar a daño local de la célula sombreada. En el peor de los casos, estos puntos calientes pueden provocar un incendio.

20 El remedio más común para la prevención de los puntos calientes es la aplicación de diodos de derivación que inician la conducción a una baja tensión relativa en una dirección y que aíslan en la otra dirección, como se ha descrito en los documentos US 5.223.044 y WO 2005/101511. Sin embargo, la aplicación de diodos de derivación es cara. En particular, con módulos fotovoltaicos de película fina que tienen una tensión de ruptura dieléctrica relativamente baja (típica de < 8V), el número de células que pueden ser protegidas por diodos de derivación es pequeño, es decir, alrededor de menos de 10 para una película delgada a-Si.

25 En el caso de módulos PV de película fina, los diodos de derivación monolíticos pueden fabricarse a costa de un proceso muy complejo para una conexión en serie.

30 Otro método es la aplicación de las llamadas derivaciones PV, como se describe en el documento US 2003/0159728. De acuerdo con este método, varios módulos que constan de células conectadas en serie se conectan en paralelo. Cuando un módulo es en parte sombreado, la tensión inversa sobre las células sombreadas disminuye con la tensión de los módulos completamente iluminados. Sin embargo, las conexiones en serie combinada y paralela disminuyen la tensión del sistema y aumentan la corriente del sistema y limitan la libertad de diseño del sistema.

35 En el documento EP 1 079 441 se describe un método para la adaptación de la característica IV de un módulo PV parcialmente sombreado. De acuerdo con este método, las células se exponen a una tensión de CA sesgada creciente hasta que la corriente comienza a aumentar. Después del tratamiento, las células muestran una conducción no lineal que permite a una célula sombreada conducir la corriente de cortocircuito de las células iluminadas a una tensión relativamente baja. Sin embargo, este método depende de la presencia de puntos accidentales en la célula PV, donde la conducción no lineal se puede introducir. Además, el contacto directo con todas las células es necesario.

45 El documento US 5.810.945 describe un método de fabricación de un dispositivo microestampado electrónico, en particular una célula solar, en el que al menos uno de los electrodos está provisto de un estampado. El problema de sombreado no se aborda en esta referencia.

50 Toet et al. (D. Toet et al., *Thin Solid Films* 296 (1977) 49-52) describe una técnica de dos etapas para el crecimiento de películas delgadas de silicio policristalino sobre sustratos de vidrio. El problema del sombreado no se aborda.

55 Wohlgemuth et al. (J. Wohlgemuth y W. Herrmann, *Hot spot test for crystalline silicon modules, Photovoltaic Specialists Conference*, 2005, Piscataway, NJ, Estados Unidos 3-7 de enero de 2005, IEEE, Estados Unidos, 3 de enero de 2005, páginas 1062-1063) describe métodos para la realización de pruebas de puntos calientes. No se discute la prevención de la formación de puntos calientes.

60 Es por tanto un objeto de la presente invención proporcionar un remedio para la prevención de los puntos calientes que no muestra ninguna de las desventajas mencionadas anteriormente, y que se puede aplicar de una manera fácil y barata. Ahora se ha encontrado que este objetivo podría alcanzarse mediante la adaptación de las características IV de las células PV de película fina mediante la introducción de puntos conductores no lineales bien definidos idénticos en posiciones definidas con precisión. Para este fin, la invención se refiere a un módulo fotovoltaico (PV) de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende una pluralidad de células, cada célula conteniendo un sustrato, una capa de electrodo conductor transparente, una capa fotovoltaica y una capa de electrodo trasera, donde la capa fotovoltaica comprende al menos una capa de silicio p-i-n o n-i-p, caracterizado por que dicha capa de silicio comprende 10 a 1000 puntos conductores de silicio recristalizado por cm^2 , teniendo cada uno, independientemente, una superficie de 10 a 2500 μm^2 , donde los puntos conductores actúan como caminos conductores no lineales entre las dos capas de electrodo y donde, a una tensión de 1 V, los puntos conductores conducen una corriente por

unidad de superficie de menos de 0,2 mA/cm², y a una tensión de 8 V, los puntos conductores conducen una corriente por unidad de superficie de más de 10 mA/cm².

5 Este método se basa en el hecho de que la mayoría de las células fotovoltaicas se componen de una capa de semiconductor activo que tiene capas de electrodos en ambos lados. Al menos una de estas capas de electrodo es transparente, de manera que la luz puede llegar a la capa activa.

10 Según la invención, la capa activa de la célula PV se calienta localmente para que la capa se transforme al menos parcialmente en otra fase. El material transformado pierde las características fotovoltaicas pero las propiedades semiconductoras se pueden conservar mediante la dosificación cuidadosa de la cantidad de calor. Como resultado, los puntos transformados actúan como caminos conductores no lineales entre las dos capas de electrodos que tienen una conductividad relativamente baja a baja tensión y una conductividad relativamente alta en alta tensión. Más en particular, a una tensión de 1 V, los puntos conductores conducen una corriente por unidad de superficie de menos de 0,2 mA/cm², y a una tensión de 8 V, los puntos conductores conducen una corriente por unidad de superficie de más de 10 mA/cm².

15 En la presente memoria descriptiva, el material transformado a veces puede indicarse como silicio recristalizado, y el proceso de formación a veces puede indicarse como fusión seguida de recristalización. Sin embargo, esta descripción no debe en modo alguno considerarse como limitante de la naturaleza de la presente invención. Será evidente que el quid de la presente invención es la presencia de puntos conductores, y en su formación por medio de tratamiento térmico. Este no reside en la forma cristalina del silicio o en si la fusión o la recristalización tienen o no lugar.

20 Con el fin de minimizar la producción de calor local, muchos de esos puntos conductores no lineales deben hacerse de manera que la corriente por punto sea pequeña.

25 La corriente a través de los puntos conductores no lineales puede describirse como con una expansión de serie impar:

$$30 \quad J_{\text{puntosconductores}}(V) = \frac{V}{R_1} + \frac{V^3}{R_3} + \frac{V^5}{R_5} + \dots \quad (1)$$

35 Donde $J_{\text{puntosconductores}}(V)$ es la corriente por unidad de superficie a través de los puntos conductores a la tensión V [A/cm²]; V es la tensión entre los dos electrodos [V]; y $1/R_n$ es el coeficiente de orden n de la expansión de la serie. La dimensión de R_n es [Vn · cm²/A].

40 La parte directamente alrededor de una tensión de $V = 0$ se determina principalmente por R_1 , la siguiente parte también por R_3 , etc. Para la descripción de la parte esencial de la curva de JV de una célula PV, los coeficientes de R_1 y R_3 son suficientes. R_1 debe ser tan alto como sea posible por que la conducción lineal comienza a causar pérdidas a una tensión baja. R_3 debe ser elegido de modo que la corriente máxima posible se conduce a una tensión inferior a la tensión de ruptura.

45 Sin la introducción de los puntos conductores no lineales, la tensión inversa sobre una célula sombreada puede ser tan alta como -19 V en el caso de un módulo con 28 células cuando está en cortocircuito el módulo ($R_1 = 10\ 000$, $R_3 = 1.000.000$). Con un número mayor de células, aumenta la tensión inversa sobre la célula sombreada. Esa gran tensión está mucho más allá de la tensión de ruptura. Con los puntos conductores no lineales ($R_1 = 2500$, $R_3 = 10\ 000$), la tensión sobre una célula sombreada se limita a -5 V, que está por debajo de la tensión de ruptura. R_1 muestra una disminución relacionada con la introducción de R_3 . La curva de JV en condiciones normales (sin sombreado) apenas se ve afectada por los puntos conductores no lineales. Con un número creciente de células, la tensión inversa sobre una célula sombreada permanece sobre -5 V cuando el módulo está en cortocircuito.

50 Cuando los puntos conductores no lineales se aplican en todas las células de un módulo de manera que la capa de silicio p-i-n o n-i-p comprende de 10 a 1000 puntos conductores de silicio recristalizado por cm², que tienen cada uno independientemente una superficie de 10 a 2500 μm², el sombreado no causa daño independientemente del número de células conectadas en serie. Debido a que se introduce un gran número de puntos conductores distribuidos regulares, la energía disipada en la célula sombreada también se distribuye regularmente sobre la célula PV. Se evita un calentamiento excesivo de un solo punto. El rendimiento del módulo en condiciones normales apenas se ve afectado por los puntos conductores no lineales.

60 En una realización preferente, el módulo PV tiene una capa de silicio que comprende de 20 a 500 puntos conductores por cm², más preferentemente de 30 a 300 puntos conductores por cm², aún más preferentemente de 80 a 120 puntos conductores por cm². En otra realización preferente, el módulo PV tiene una capa de silicio donde los puntos conductores tienen una superficie de 30 a 300 μm², preferentemente de 50 a 150 μm², más preferentemente de 60 a 120 μm².

Debido a que los puntos no contribuyen a la producción de corriente en condiciones normales de funcionamiento, se prefiere que el área de superficie total de los puntos conductores sea relativamente pequeña. Más en particular, la relación del área superficial de los puntos conductores respecto a la superficie de la parte de generación de corriente de la célula solar es preferentemente de menos de 0,01:1, más preferentemente menos de 0,001:1. Como un valor mínimo preferido, una proporción de 0,00001:1 puede ser mencionada.

Es otro objetivo de la invención proporcionar un método para la fabricación de los módulos PV anteriores. Los puntos conductores no lineales se pueden obtener de varias maneras. Una forma es la obtención de puntos no lineales mediante la aplicación de una tensión de CA creciente sobre las células que se ponen en contacto directamente con electrodos largos. Sin embargo, al hacerlo los puntos están distribuidos al azar y las propiedades de los puntos dependen de las condiciones locales accidentales de la capa activa de la célula PV.

Los puntos bien definidos se obtienen llevando una cantidad definida de energía a la capa activa de la célula PV en posiciones definidas. De acuerdo con un método preferido, la capa de silicio p-i-n o n-i-p se calienta localmente en 10 a 1000 puntos por cm², cada punto teniendo independientemente una superficie de 10 a 2500 μm², por lo que dicho silicio se transforma al menos parcialmente a otra fase en estos puntos. Por ejemplo, esto puede llevarse a cabo con el haz enfocado de un láser de impulsos del cual la longitud de onda es tal que se absorbe en la capa activa de la célula PV. Con las células PV de Si amorfas, puede ser utilizado un láser Nd-YAG, Nd-YFL o Nd-YVO4 Q-conmutado de frecuencia doble (λ = 532 nm). La duración del pulso de tales láseres es corta, típicamente de menos de 50 ns (nanosegundos), más típicamente de aproximadamente 15 ns, de manera que el punto directamente iluminado absorbe toda la energía sin pérdidas debidas a la conducción del calor. La energía del pulso es constante dentro de un intervalo estrecho y el diámetro del arqueado del haz en el punto de enfoque puede ser pequeño de acuerdo a:

$$d = \frac{1,22 \cdot \lambda \cdot F}{D} \quad (2)$$

donde

- d es el diámetro del arqueado del haz;
- λ es la longitud de onda de la luz láser;
- F es la distancia focal de la lente de enfoque; y
- D es el diámetro del haz láser paralelo antes de entrar en la lente

Con D = 5 mm, F = 100 mm y λ = 532 nm se deduce que d = 13 μm. En el arqueado, el haz de láser tiene un perfil de intensidad de Gauss de forma que los tamaños de los puntos no lineales que se hacen con el láser son todavía más pequeños.

La invención se ilustra adicionalmente mediante la siguiente descripción no limitativa de una realización específica de la invención.

Los módulos de tamaño pequeño (8 células de 1 x 7,5 cm²) y los módulos de mayor tamaño (28 células de 1 x 30 cm²) fueron tratados con un láser de ND-YVO4 pulsado. Se realizó una sola fila de puntos conductores no lineales (distancia entre 2 puntos de 50 μm) por célula.

El tratamiento con láser presenta una conductancia no lineal de las células que se puede caracterizar con los valores de R_n de la ecuación (1). Un método para determinar R_n se describe a continuación. Las curvas JV de células individuales se pueden describir con la ecuación del diodo bien conocida (véase S.R. Wenham et al., *Applied Photovoltaics*, ISBN 0 86758 909 4, p. 33), cuya ecuación se extiende en términos de la corriente inducida por luz y la resistencia en paralelo no lineal:

$$J = J_0 \cdot (e^{\frac{qV}{nkT}} - 1) - J_L + \frac{V}{R_1} + \frac{V^3}{R_3} + \dots \quad (3)$$

donde

- J es la densidad de corriente [A/m²]
- J₀ es la densidad de corriente de oscuridad [A/m²]
- J_L es la densidad de corriente inducida por la luz [A/m²]
- q es la carga elemental
- k es la constante de Boltzmann
- n es el factor de calidad de diodo
- T es la temperatura [K]
- V es la tensión por célula

La curva JV de un módulo completamente iluminado es solo ligeramente sensible para los valores variables de R_n de las células normales. Cuando una de las células está sombreada, la curva JV cambia fuertemente. La corriente inducida por la luz de la célula sombreada es (casi) cero. Las células iluminadas aplican una tensión inversa sobre la célula sombreada que se varía con la fuente de tensión externa. La célula sombreada actúa como una especie de resistencia de carga para las células iluminadas del módulo. Las curvas JV teóricas de las células iluminadas son insensibles para R_n cuando las células no se desvían fuertemente. Por el contrario, la curva JV de la célula sombreada es fuertemente dependiente de R_n y también lo es la curva JV de un módulo con una célula sombreada.

En primer lugar, se mide la curva JV del módulo completamente iluminado. Los parámetros de la célula promedio incluyendo R_n se determinan a partir de esa curva. A continuación, la curva JV del módulo se graba mientras que sombrea una célula. Los valores de R_n de la célula sombreada se obtienen con un procedimiento de ajuste de curvas. La corriente inducida por la luz de la célula sombreada $J_{L, \text{ célula sombreada}} = 0$ y solo R_n de la célula sombreada deben adaptarse para obtener un ajuste apropiado. Los valores promedios de R_1 y R_3 y los valores de R_1 y R_3 de la célula sombreada que resultan del procedimiento de ajuste se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de R_1 y R_3 que se derivan del procedimiento de ajuste de curvas

	$R_{1, \text{ media}}$	$R_{3, \text{ media}}$	$R_{1, \text{ célula 4}}$	$R_{3, \text{ célula 4}}$
Antes del tratamiento con láser	20 000	2.000.000	6000	66 000
Después del tratamiento con láser	3500	20 000	2500	13 500

La disminución del valor medio de R_1 es realista, la del valor promedio de R_3 es más o menos arbitraria por que la curva calculada del módulo completamente iluminado está apenas influenciada por ese valor. La disminución de R_1 y R_3 de la célula sombreada se determina con una precisión aceptable. R_5 no juega un papel importante para el ajuste de la parte relevante de las curvas JV siempre que el valor de R_5 se elija suficientemente grande.

Los valores de R_1 y R_3 de las células individuales se pueden utilizar para la caracterización de la calidad del proceso de tratamiento con láser. Un intervalo de valores para las células de operación apropiadas se puede definir para ambos parámetros: $R_1 > 1000$, en particular, $R_1 > 2000$; $1000 < R_3 < 50\ 000$, en particular $10\ 000 < R_3 < 50\ 000$ (esos valores pueden cambiarse).

La Tabla 2 muestra curvas de J-V de un módulo de ocho células. La primera columna indica la tensión del módulo. Las columnas segunda y tercera dan la corriente del módulo y la tensión sobre una célula, respectivamente, frente a la tensión del módulo (sin sombreado). Las columnas cuarta y quinta dan la corriente del módulo y la tensión sobre la célula estándar sombreada frente a la tensión del módulo (una célula sombreada). La sexta y la séptima columna dan la corriente del módulo y la tensión sobre la célula sombreada con puntos conductores frente a la tensión del módulo (una célula sombreada).

La figura 1 proporciona una representación gráfica de la tensión de una sola célula en comparación con la tensión de un módulo de ocho células (datos numéricos dados en la Tabla 2).

La figura 2 da las curvas JV del módulo de ocho células, que muestra la corriente del módulo frente a la tensión del módulo (datos numéricos dados en la Tabla 2).

Es evidente que la tensión inversa sobre una célula sombreada con los puntos conductores se limita mientras que la tensión sobre una célula sombreada estándar aumenta casi linealmente con la tensión del módulo.

Tabla 2

$V_{\text{módulo}}$	Sin células sombreadas		Sin tratar Una célula sombreada		Tratada Una célula sombreada	
	J [A/cm^2]	$V_{\text{célula}}$ [V]	J [A/cm^2]	$V_{\text{célula n-ésima}}$ [V]	J [A/cm^2]	$V_{\text{célula n-ésima}}$ [V]
0	-0,01333	0,000	-0,00133	-5,753	-0,00858	-4,72066
0,32	-0,01329	0,040	-0,00116	-5,445	-0,00777	-4,53519
0,64	-0,01325	0,080	-0,00101	-5,136	-0,00697	-4,33839
0,96	-0,01321	0,120	-0,00088	-4,826	-0,00619	-4,13143

ES 2 620 092 T3

V _{módulo}	Sin células sombreadas		Sin tratar Una célula sombreada		Tratada Una célula sombreada	
	J [A/cm ²]	V _{célula} [V]	J [A/cm ²]	V _{célula n-ésima} [V]	J [A/cm ²]	V _{célula n-ésima} [V]
1,28	-0,01316	0,160	-0,00076	-4,515	-0,00545	-3,91506
1,6	-0,01311	0,200	-0,00065	-4,203	-0,00474	-3,68978
1,92	-0,01305	0,240	-0,00054	-3,964	-0,00407	-3,45636
2,24	-0,01299	0,280	-0,00045	-3,654	-0,00346	-3,21435
2,56	-0,01292	0,320	-0,00037	-3,343	-0,0029	-2,96425
2,88	-0,01284	0,360	-0,0003	-3,030	-0,00239	-2,70627
3,2	-0,01274	0,400	-0,00025	-2,715	-0,00194	-2,44065
3,52	-0,01262	0,440	-0,0002	-2,397	-0,00154	-2,16766
3,84	-0,01246	0,480	-0,00015	-2,078	-0,0012	-1,88769
4,16	-0,01221	0,520	-0,00012	-1,755	-0,00091	-1,60124
4,48	-0,0118	0,560	-8,4E-05	-1,431	-0,00067	-1,30893
4,8	-0,01113	0,600	-5,7E-05	-1,105	-0,00047	-1,01159
4,96	-0,01067	0,620	-4,6E-05	-0,942	-0,00039	-0,86132
5,12	-0,01012	0,640	-3,6E-05	-0,780	-0,00031	-0,71015
5,28	-0,00947	0,660	-2,7E-05	-0,620	-0,00023	-0,55822
5,44	-0,00874	0,680	-1,6E-05	-0,465	-0,00017	-0,40568
5,6	-0,00792	0,700	-3,5E-06	-0,311	-0,0001	-0,25265
5,76	-0,00704	0,720	9,18E-06	-0,157	-3,9E-05	-0,09932
5,92	-0,00609	0,740	2,08E-05	-0,005		
6,08	-0,00508	0,760				
6,24	-0,00402	0,780				
6,4	-0,00292	0,800				
6,56	-0,00177	0,820				
6,72	-0,00059	0,840				

REIVINDICACIONES

1. Módulo fotovoltaico (PV) que comprende una pluralidad de células fotovoltaicas de película delgada, cada célula conteniendo un sustrato, una capa de electrodo conductor transparente, una capa fotovoltaica y una capa de electrodo trasera, donde la capa fotovoltaica comprende al menos una capa de silicio p-i-n o n-i-p, caracterizado por que dicha capa de silicio comprende 10 a 1000 puntos conductores de silicio recristalizado por cm^2 , teniendo cada uno, independientemente, una superficie de 10 hasta $2500 \mu\text{m}^2$, donde los puntos conductores actúan como caminos conductores no lineales entre las dos capas de electrodos y donde, en una tensión de 1 V o menos, los puntos conductores conducen una corriente por unidad de superficie de menos de $0,2 \text{ mA/cm}^2$, y a una tensión de 8 V o más, los puntos conductores conducen una corriente por unidad de superficie de más de 10 mA/cm^2 .
2. El módulo PV de la reivindicación 1, donde la capa de silicio comprende 20 a 500 puntos conductores por cm^2 , preferentemente de 30 a 300 puntos conductores por cm^2 , más preferentemente 80 a 120 puntos conductores por cm^2 .
3. El módulo PV de la reivindicación 1 o 2, donde los puntos conductores tienen una superficie de 30 a $300 \mu\text{m}^2$, preferentemente 50 a $150 \mu\text{m}^2$, más preferentemente de 60 a $120 \mu\text{m}^2$.
4. Un método para fabricar el módulo PV de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde la capa de silicio p-i-n o n-i-p se calienta localmente en 10 a 1000 puntos por cm^2 , cada punto teniendo independientemente una superficie de 10 a $2500 \mu\text{m}^2$, donde el silicio p-i-n o n-i-p se transforma en estos puntos para formar puntos conductores, donde, a una tensión de 1 V o menos, los puntos conductores conducen una corriente por unidad de superficie de menos de $0,2 \text{ mA/cm}^2$, y a una tensión de 8 V o más, los puntos conductores conducen una corriente por unidad de superficie de más de 10 mA/cm^2 .
5. El método de acuerdo con la reivindicación 4, donde el calentamiento se realiza por un láser pulsado.
6. El método de acuerdo con la reivindicación 5, donde el calentamiento se realiza por un láser Nd-YAG, Nd-YLF, o Nd-VO4 de frecuencia doble con una longitud de onda λ entre 520 y 550 nm y una duración de pulso de menos de 50 ns.

Fig. 1

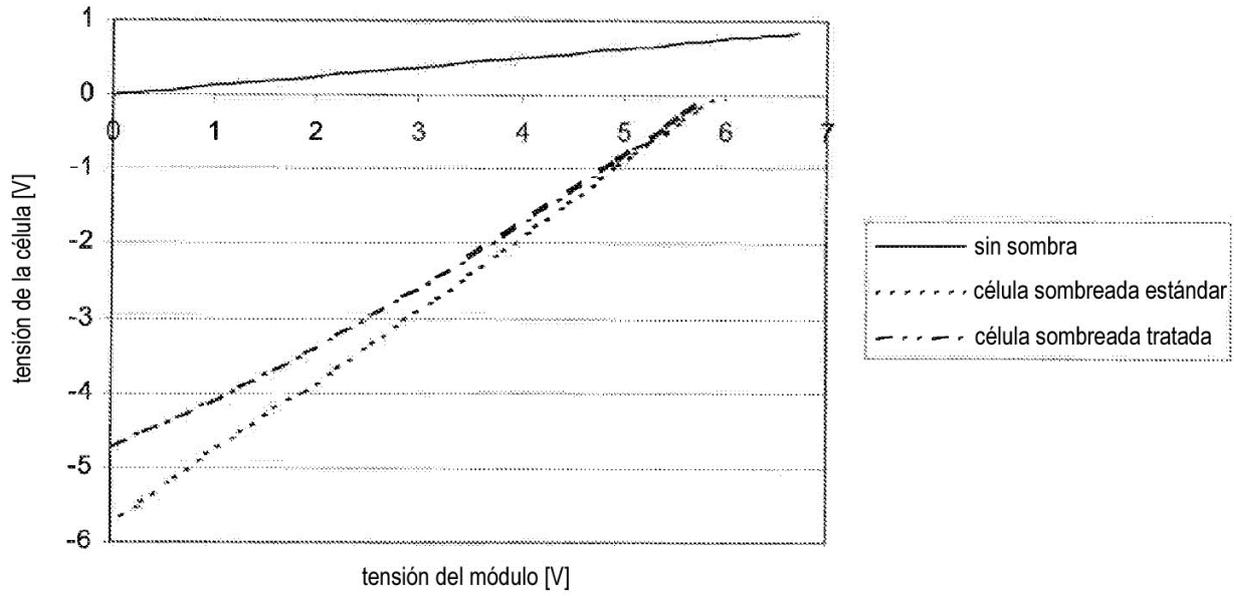


Fig. 2

