

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 610 479**

51 Int. Cl.:

**G01R 31/40** (2006.01)

**H02S 50/15** (2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.04.2015** E 15165347 (4)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.10.2016** EP 2942634

54 Título: **Procedimiento para medir y evaluar pérdidas de potencia en células solares, módulos solares e instalaciones solares mediante mediciones fotográficas por termografía y luminiscencia**

30 Prioridad:

**06.05.2014 DE 102014208462**

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

**27.04.2017**

73 Titular/es:

**FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH (100.0%)  
52425 Jülich, DE**

72 Inventor/es:

**GERBER, ANDREAS, DR.;  
RAU, UWE, PROF. DR.;  
SIEGLOCH, MAX, DIPL.-ING. y  
STOICESCU, LIVIU, DIPL.-ING.**

74 Agente/Representante:

**URÍZAR ANASAGASTI, Jesús María**

**ES 2 610 479 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**

Procedimiento para medir y evaluar pérdidas de potencia en células solares, módulos solares e instalaciones solares mediante mediciones fotográficas por termografía y luminiscencia.

5 La presente invención se refiere a un procedimiento para una evaluación de la calidad de células solares o módulos solares.

10 Por el estado de la técnica se sabe cómo realizar mediciones por termografía y luminiscencia para el control de calidad de células solares o módulos solares. Los procedimientos de formación de imágenes por termografía y luminiscencia son métodos normales de caracterización de células y módulos solares. Sin embargo, el procesamiento cuantitativo de las imágenes en el sentido de una evaluación de la potencia y de errores es un problema pendiente de resolver. Los procedimientos propuestos hasta la fecha son o bien meramente cualitativos o bien contradictorios o no concluyentes.

15 El documento WO2013/085385A describe un procedimiento para un control de una célula solar.

20 En el procedimiento termográfico se le aplica a una célula solar o a un módulo solar una tensión y/o se irradia con luz, para generar un flujo de corriente. Durante la aplicación de la tensión o la irradiación con luz se fotografía una superficie de la célula solar o del módulo con una cámara de infrarrojos. El resultado es una imagen que muestra qué zonas de la superficie se han calentado. Las zonas calentadas indican disipación de potencia, es decir pérdidas de potencia, ya que no se busca la generación de calor. Por tanto, una imagen termográfica permite hacer una afirmación sobre la calidad de una célula solar, aunque su valor informativo no es muy alto. Un procedimiento conocido ("lock-in thermography", termografía *lock-in* o activa) mide diferencias de disipación de potencia mientras que o bien se varía periódicamente la tensión aplicada entre dos valores o bien se varía periódicamente la potencia luminosa irradiada.

25 En el procedimiento por luminiscencia se aprovecha el hecho de que una aplicación de una tensión en una célula solar y/o una irradiación con luz tiene como consecuencia una emisión de luz. La emisión de luz se capta con una cámara apta para luminiscencia. A partir de la imagen puede concluirse entonces el funcionamiento de zonas individuales de la célula solar. No obstante el valor informativo vuelve a ser insuficiente, ya que directamente solo es posible una afirmación cualitativa acerca de la capacidad de funcionamiento de la célula solar.

30 Con la presente solicitud se persigue el objetivo de mejorar el control de calidad en células solares por medio de termografía o formación de imágenes por luminiscencia.

35 Para solucionar el objetivo, un procedimiento para un control de la calidad de una célula solar por medio de luminiscencia comprende las siguientes etapas:

- 40 - en una célula solar se aplica una primera tensión  $V_1$  menor o igual a cero y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una primera imagen;
- en la célula solar se aplica una segunda tensión  $V_2$ , a continuación también denominada tensión en el punto de funcionamiento, mayor de cero y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una segunda imagen;
- 45 - en la célula solar se aplica una tercera tensión  $V_3$  mayor de cero y menor que la segunda tensión y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una tercera imagen;
- en la célula solar se aplica una cuarta tensión  $V_4$  mayor que la segunda tensión y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una cuarta imagen;
- 50 - se calcula una primera diferencia D1 entre los valores de píxel de las fotografías con la primera y la segunda tensión, es decir se sustraen los valores digitales de la primera imagen de los valores digitales de la segunda imagen;
- se calcula una segunda diferencia D2 entre las imágenes correspondientes a la tercera y la cuarta tensión, es decir se sustraen los valores digitales de la cuarta imagen de los valores digitales de la tercera imagen;
- 55 - se calcula el cociente entre la primera y la segunda diferencia.

El cociente así determinado es una medida de la calidad de la célula solar. A cada píxel se le puede asociar un valor que se obtiene como resultado a partir del cálculo del cociente. Este valor representa una medida de cómo de bien contribuye la zona puntual correspondiente sobre la superficie de la célula solar a la generación de corriente.

60 Como se describió al principio, de acuerdo con el procedimiento se realizan por tanto captaciones de luminiscencia, aunque, a diferencia del estado de la técnica, con diferentes tensiones. Mediante un cálculo de la diferencia y definitivo adecuado del cociente resulta posible un control de calidad.

65 La sensibilidad de la cámara (tiempo de exposición y apertura del diafragma) se mantiene constante, en una configuración de la invención, para las cuatro imágenes anteriormente mencionadas, con el fin de obtener resultados especialmente buenos.

- El procedimiento reivindicado permite obtener, para cada píxel de una imagen de cámara digital, una información de calidad. Mediante normalización puede asociarse, por ejemplo, en una forma de realización, a cada píxel por ejemplo un valor entre 0 y 1. 1 significa que se ha alcanzado la máxima calidad posible, es decir que la corriente fotoeléctrica generada en la zona puntual correspondiente puede utilizarse al 100%. 0 significa que esta zona puntual sobre la superficie de la célula solar no contribuye a la generación de corriente. Valores entre 0 y 1 significan que es posible una contribución correspondientemente graduada, situada entre medias, a la generación de corriente, es decir que se ha alcanzado una calidad que se sitúa entre la máxima calidad posible y la mínima calidad posible. Sin embargo, no es obligatoriamente necesaria una normalización, ya que la normalización únicamente facilita la interpretación de los valores determinados.
- En una forma de realización de la invención simplificada se determina la imagen perteneciente a la segunda tensión como valor promedio de la tercera y la cuarta imagen, de modo que la segunda imagen no tiene que tomarse explícitamente.
- En una forma de realización preferida de la invención, la diferencia entre la cuarta y la segunda tensión (cuarta tensión - segunda tensión) es menor que la segunda tensión y, en concreto, preferiblemente varias veces menor. Además, la diferencia entre la segunda y la tercera tensión (segunda tensión - tercera tensión) es menor que la segunda tensión y, en concreto, preferiblemente varias veces menor. Mediante esta forma de realización se consigue ventajosamente que la tercera y la cuarta tensión se sitúen relativamente próximas a la segunda tensión. De este modo puede determinarse de manera mejorada una medida apropiada para la evaluación de la calidad de una célula solar.
- En una forma de realización preferida de la invención, la diferencia entre la cuarta y la segunda tensión (cuarta tensión - segunda tensión) asciende, en referencia a una única célula solar, a menos de 0,1 voltios, preferiblemente a menos de 0,01 voltios. Además, la diferencia entre la segunda y la tercera tensión (segunda tensión - tercera tensión) asciende a menos de 0,1 voltios, preferiblemente a menos de 0,01 voltios. Mediante esta forma de realización se consigue ventajosamente que la tercera y la cuarta tensión se sitúen próximas a la segunda tensión. De este modo puede determinarse de manera mejorada una medida apropiada para evaluar la calidad de una célula solar. En un módulo solar o un sistema modular, los valores de tensión anteriormente se entienden como tensión por cada célula solar conectada en serie.
- El punto de funcionamiento, es decir la segunda tensión, puede elegirse libremente. La segunda tensión es preferiblemente, sin embargo, esencialmente mayor que la respectiva distancia de la tercera y la cuarta tensión con respecto a la segunda tensión, con el fin de poder evaluar especialmente bien la calidad de la célula solar.
- La tercera y la cuarta toma se refieren por tanto a la tensión próxima al punto de funcionamiento. Si la tensión en el punto de funcionamiento asciende por tanto, por ejemplo, a 0,6 voltios, entonces el valor de la tercera tensión asciende por tanto por ejemplo a 0,59 voltios y el valor de la cuarta tensión a 0,61 voltios. Los valores de tensión de la tercera y cuarta tensión varían por tanto ventajosamente solo un poco alrededor del punto de funcionamiento, con el fin de poder obtener como resultado una derivada local, ya que la función de luminiscencia no se comporta linealmente, es decir la dependencia de la luz en función de la corriente aplicada. Para penetrar aquí ventajosamente en una zona casi lineal, se prevén preferiblemente solo pequeñas variaciones de tensión alrededor del punto de funcionamiento.
- En una forma de realización preferida de la invención, la célula solar se encuentra durante las mediciones bajo una iluminación espacialmente homogénea y constante en el tiempo, con el fin de llegar a resultados adicionalmente mejorados.
- En una configuración adicionalmente mejorada de la invención, la segunda tensión se elige de modo que para la iluminación dada se alcance el máximo de potencia de la célula solar, con el fin de poder evaluar la calidad de la célula solar de manera práctica. Las células solares se hacen funcionar en principio al máximo de potencia. La evaluación de la calidad se refiere en esta configuración al estado que suele ser determinante en funcionamiento. La información resultante acerca de la calidad de la célula solar es por tanto especialmente relevante en la práctica.
- Si el cociente se ha determinado de acuerdo con lo reivindicado, se obtendrán para los píxeles con los que se efectuó una toma valores que en principio no pueden ascender a entre 0 y 1. Para facilitar la evaluación de la calidad se efectúa por tanto, en una forma de realización ventajosa, una normalización. Se realizan por tanto ventajosamente una o varias etapas de normalización, que tienen como consecuencia que a partir del cálculo del cociente se obtienen al final valores de 0 a 1.
- Para normalizar se multiplican, en una forma de realización, los valores del cociente por la tensión térmica. A continuación se divide por la diferencia de tensión de la tercera y la cuarta toma. Tensión térmica quiere decir constante de Boltzmann por temperatura absoluta de la célula solar dividido por la carga elemental.
- Si gracias a la normalización se obtienen valores de 0 a 1, entonces para cada píxel puede afirmarse de manera directamente reconocible con qué probabilidad la corriente fotoeléctrica localmente generada puede captarse

también realmente. Si se determina para un píxel un valor 1, entonces la probabilidad asciende al 100 % de que la corriente aquí generada también pueda captarse realmente. Si se determina para un píxel un valor de 0,5, entonces la probabilidad asciende al 50 % de que la corriente aquí generada también pueda captarse realmente. Si por ejemplo se determina para un píxel un valor de 0,25, entonces la probabilidad asciende al 25 % de que la corriente aquí generada también pueda captarse realmente.

En una configuración ventajosa de la invención se saca el promedio de los valores que se obtienen como resultado a partir del cálculo del cociente para todos los píxeles. El resultado de este promediado representa entonces una medida de la calidad de una célula solar que ha de evaluarse. Cuando mayor sea el valor resultante, mejor será la calidad de la célula solar.

En una configuración ventajosa del procedimiento de acuerdo con lo reivindicado se registra una curva característica de tensión, para determinar así el punto de potencia máximo de una célula solar que ha de evaluarse. La célula solar se ilumina con luz constante y en la célula solar se aplica una tensión variable y se determina la corriente perteneciente a cada tensión y así se determina una curva característica de corriente-tensión. Mediante estas curvas características se determina el punto máximo de extracción de potencia. Si se determina así, por ejemplo, que asciende a 0,55 voltios el punto de máxima extracción de potencia, entonces la tensión en el punto de funcionamiento asciende ventajosamente a 0,55 voltios. La tensión en el punto de funcionamiento también puede ascender sin embargo a menos o más de 0,55 V, con el fin de poder llevar a cabo el procedimiento con éxito. En un módulo solar o un sistema modular, los valores de tensión anteriores se entienden como tensión por cada célula conectada en serie.

En una configuración, la medición de luminiscencia se realiza por medio de un sistema de cámaras apropiado bajo la condición de que (1) la célula solar, el módulo solar o la instalación solar se encuentra bajo una excitación luminosa externa, artificial o natural, (2) la tensión aplicada en la célula, en el módulo o en la instalación en una primera medición de un valor menor o igual a cero se modula al valor de una positiva tensión discrecional  $V_2$  y se genera una imagen mediante cálculo de la diferencia o mediante tecnología *lock-in*, (3) en una segunda medición la tensión se varía simétricamente, con una diferencia del 20 % o menos, en la tensión  $V_2$  y se genera una imagen mediante cálculo de la diferencia o mediante tecnología *lock-in*. (4) El modo de proceder descrito se realiza preferiblemente bajo la condición de que la tensión  $V_2$  es la tensión  $V_{mp}$  del punto de máxima extracción de potencia.

En una configuración se evalúa por medio de un procedimiento termográfico la calidad de la célula solar. El procedimiento se lleva a cabo entonces alrededor del punto de máxima extracción de potencia del módulo solar o de la célula solar iluminado de manera homogénea, puesto que en el punto de máxima extracción de potencia por definición la primera derivada de la potencia extraída según la tensión aplicada desde fuera es cero. Por tanto, sin embargo, también la primera derivada de la potencia disipada según la tensión aplicada desde fuera es 0. En una célula solar que funcione perfectamente estarían en el punto de máxima extracción de potencia, sin embargo, todos los puntos a la misma tensión en el punto de máxima extracción de potencia o mínima disipación, de modo que la primera derivada de la disipación con respecto a la tensión externa es cero en todos los puntos. Sin embargo este nunca es el caso en la práctica. Se obtienen como resultado por tanto en el punto de máxima extracción de potencia en la práctica tanto valores positivos como valores negativos para la primera derivada de la disipación local con respecto a la tensión externa. Esto se aprovecha para comprobar la calidad. De acuerdo con el procedimiento se determina por tanto la primera derivada para cada píxel en el punto de máxima extracción de potencia.

Para la realización se toman, como en el caso de la medición por luminiscencia, cuatro imágenes con las tensiones aplicadas  $V_1$  a  $V_4$ , siendo la tensión  $V_1$  igual a cero (no hay extracción de potencia), correspondiendo la tensión  $V_2$  al punto de máxima extracción de potencia, siendo la tensión  $V_3$  mayor de cero pero menor que  $V_2$  y siendo las tensiones  $V_4$  mayores que la tensión  $V_2$ . En primer lugar se sustrae por píxeles la imagen perteneciente a la tensión  $V_1$  de la imagen correspondiente a  $V_2$ , con el fin de obtener una primera imagen diferencial D1. El valor promedio M de todos los píxeles de esta imagen diferencial es entonces proporcional a la extracción de potencia máxima promedio. Después se sustrae por píxeles la imagen de  $V_3$  de la imagen de  $V_4$ , con el fin de obtener una segunda imagen diferencial D2. Si las tensiones de  $V_3$  y  $V_4$  están aplicadas, tal como se ha descrito, alrededor del punto de máxima extracción de potencia, esta segunda imagen diferencial consta de valores positivos y negativos. Si estos valores positivos y negativos se dividen por el valor promedio anteriormente determinado, cada valor de píxel corresponde a la desviación porcentual de la disipación de potencia local con respecto al valor promedio. La representación obtenida de esta manera representa por tanto cuantitativamente la ausencia de homogeneidad de la disipación de potencia. Si por ejemplo la imagen diferencial D1 tiene un valor promedio de 2000 y un punto de imagen en la imagen diferencial D2 tiene un valor de 200, entonces la disipación diferencial (consumo de potencia) corresponde en ese punto a un 10 % de la extracción de potencia máxima promedio. En caso de valores negativos en la imagen diferencial D2, el punto correspondiente todavía no ha alcanzado su propio punto de máxima potencia. Un valor de por ejemplo -200 corresponde entonces a un aumento de la extracción de potencia (reducción de la disipación, es decir generación de potencia) de alrededor del 10 % de la extracción de potencia máxima promedio.

Preferiblemente, para llevar a cabo el procedimiento termográfico se aplica una tecnología *lock-in*, con el fin de minimizar problemas atribuibles a ruido. En esta configuración se varía la tensión aplicada periódicamente entre dos valores de tensión y el cálculo de la diferencia se realiza mediante una tecnología *lock-in*, aunque no sólo una vez,

sino múltiples veces, como ejemplo 100 o 1000 veces. En una tecnología *lock-in* para la termografía ha de tenerse en cuenta que las variaciones de temperatura aparecen en el módulo con un cierto retardo temporal con respecto a la tensión aplicada. Este efecto se tiene en cuenta en la tecnología *lock-in* calculando para cada píxel tanto una amplitud (proporcional a la temperatura que aparece como máximo durante la modulación) como un ángulo de fase (rige para el retardo temporal de la señal de temperatura con respecto a la señal de excitación). Para obtener la señal de temperatura, que es proporcional a la potencia local, se corrige la imagen que aparece según el procedimiento conocido en cuanto al desplazamiento de fase. Las imágenes diferenciales así obtenidas D1 (variación de la tensión entre  $V_1$  y  $V_2$ ) y D2 (variación de la tensión entre  $V_3$  y  $V_4$ ) son entonces resultado inmediato de la tecnología *lock-in*. El modo de proceder subsiguiente de la evaluación de imagen se mantiene tal como se ha descrito.

La tecnología *lock-in* para el cálculo de la diferencia se aplica preferiblemente también en el procedimiento por luminiscencia, ya que también aquí se suprime ruido mediante la tecnología *lock-in* y se aumenta la precisión. Además aparecen también aquí inmediatamente las imágenes diferenciales D1 y D2. A diferencia de la termografía, en la luminiscencia no se esperan desplazamientos de fase por la tecnología *lock-in*.

En una forma de realización preferida, la medición por termografía se realiza por medio de un sistema de cámaras apropiado bajo la condición de que la célula solar, el módulo solar o la instalación solar se encuentre cerca de o en su punto de máxima extracción de potencia bajo una excitación luminosa externa artificial o natural. Se toman en cada caso una imagen a una tensión  $V_3$ , que preferiblemente se ha reducido en un 20 % o menos con respecto a la tensión ( $V_{mpp}$ ) del punto de máxima potencia, y una imagen a una tensión  $V_4$ , que preferiblemente se ha aumentado en un 20 % o menos con respecto a la tensión del punto de máxima potencia. Ambas imágenes se generan a su vez de nuevo mediante tecnología *lock-in* bajo modulación periódica de la tensión aplicada entre cero y la tensión del respectivo punto de funcionamiento. Mediante cálculo de la diferencia a partir de ambas imágenes se genera una nueva imagen correspondiente a D2. El valor promedio M, que se determinó en la realización anterior como valor promedio de la imagen diferencial D1, puede determinarse en esta realización como valor promedio común de ambas imágenes (a  $V_3$  y  $V_4$ ).

Los procedimientos propuestos permiten una interpretación concluyente y cuantitativa de los resultados. En el caso de las imágenes termográficas se obtiene directamente una medición con resolución espacial del consumo de potencia o de la generación de potencia local. En el caso de la luminiscencia se obtiene una medición con resolución espacial de la contribución local a la máxima potencia del módulo solar o de la célula solar. Es decir, ambos procedimientos proporcionan una representación intuitiva y cuantitativa de la calidad del módulo solar o de la célula solar.

Los procedimientos se aplican preferiblemente para:

- (1) Control de calidad de células solares y módulos solares, en especial procedimientos automatizados relacionados con la producción bajo iluminación artificial.
- (2) Análisis de errores de módulos solares antes de su instalación bajo iluminación artificial o natural, en especial en busca de daños en el transporte.
- (3) Análisis de errores de instalaciones fotovoltaicas completas tras la instalación y tras mucho tiempo en uso bajo iluminación natural, en especial ensuciamiento, deterioro o daños en módulos individuales.

A continuación se explican los fundamentos matemáticos.

#### Termografía

La potencia disipada  $P_d$  en un módulo solar se obtiene a partir de la diferencia de la potencia irradiada  $P_{in}$  y de la potencia extraída  $P_{ex}$ . En el punto de máxima extracción de potencia se obtiene por tanto un mínimo de potencia disipada, es decir pequeñas variaciones  $\Delta V_{ext}$  de la tensión externa  $V_{ext}$  no conducen a ninguna variación de la potencia disipada.

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta V_{ext}} \approx \frac{d}{dV_{ext}} (P_{in} - P_{ex}) = 0 \quad (1)$$

Debido al mantenimiento de potencia es válido para la densidad de potencia localmente disipada  $p_d$  integrada por toda la superficie A de la célula, del módulo, de la instalación, que

$$\frac{\Delta P_d}{\Delta V_{ext}} \approx \int_A \frac{d}{dV_{ext}} p_d dA = 0 . \quad (2)$$

Una medición modulada de la disipación diferencial  $dp_d/dV_{ext}$  realizada en el punto de máxima extracción de potencia conduce por consiguiente a una imagen que o bien es cero de manera global o bien consta a partes iguales de partes negativas y positivas. El mismo resultado aparece mediante cálculo de la diferencia entre una imagen, que se tomó a una tensión por encima de la tensión de máxima extracción de potencia y una imagen que se tomó a una tensión por debajo de la misma.

La figura 1 muestra una potencia extraída  $P_{ex}$  como función de la tensión del módulo  $V$ . digamos que la curva A es la curva característica de potencia / tensión promedio del módulo y las curvas B y C son la extracción de potencia local en un punto B o C. La diferencia  $P_4-P_3$  de la extracción de potencia global (curva A) a las tensiones  $V_4$  y  $V_3$  es (prácticamente) cero. Las diferencias  $\Delta p_{ex,B}$  y  $\Delta p_{ex,C}$  de las potencias extraídas localmente son o bien positivas (curva B) o bien negativas (curva C). El signo de las potencias diferenciales disipadas localmente  $\Delta p_{diss,A/B}$  es el inverso con respecto al de las potencias diferenciales extraídas  $\Delta p_{ex,A/B}$ . Los puntos cuya extracción de potencia local es positiva (negativa), tienen en la termografía una disipación diferencial con signo negativo (positivo).

15 Modo de proceder:

En primer lugar se calcula a partir de la curva característica corriente-tensión del elemento constructivo la curva característica de potencia (figura 1). A partir de la curva característica de potencia (curva A) se determinan después la tensión  $V_2 = V_{mpp}$  de máxima extracción de potencia y dos puntos de tensión  $V_3$  y  $V_4$  a la izquierda o a la derecha de  $V_2$ , de modo que la diferencia  $P_2-P_1$  de la extracción de potencia global es (prácticamente) cero. Entonces se varía la tensión periódicamente entre  $V_3$  y  $V_4$  y se mide la extracción de potencia diferencial directamente mediante termografía activa (*lock-in*). Una segunda posibilidad consiste en que generar una imagen termográfica 1 mediante modulación periódica de la tensión aplicada entre 0 y  $V_3$  y una imagen 2 mediante modulación periódica de la tensión aplicada entre 0 y  $V_4$  y a continuación determinar la diferencia entre la imagen 2 y la imagen 1.

Las señales termográficas detectadas son proporcionales a la temperatura local de la célula, del módulo o de la instalación. Debido a la inercia térmica, la temperatura está desplazada en fase en caso de excitación periódica con respecto a la potencia disipada. Para obtener señales positivas y negativas según la ecuación (2), se corregirá por tanto la señal detectada en este avance de fase. Tras esta corrección aparece una imagen (véase la ilustración 2) con zonas de señales negativas (para zonas en las que la célula, el módulo o la instalación tiene un punto de funcionamiento que se encuentra, en relación al punto de funcionamiento elegido, a mayores tensiones, curva B en la ilustración 1) y señales positivas (para zonas defectuosas con punto de funcionamiento más bajo, curva C en la ilustración 1). A partir de las señales locales puede generarse mediante integración del cuadrado absoluto o solo de las partes positivas de la señal (zonas defectuosas) un valor de medición para evaluar la calidad fotovoltaica de una célula, de un módulo, de una instalación. En el caso ideal de la extracción de potencia homogénea, tanto la integral del cuadrado absoluto como la integral de la parte positiva de la señal serían cero.

La figura 2 muestra una representación de (a) la posición de fase de la señal original (no rotada en fase) y (b) la amplitud de la señal termográfica diferencial rotada  $45^\circ$  de un minimódulo de silicio amorfo, medida en el punto de máxima extracción de potencia. Las dos células superiores tienen predominantemente una posición de fase de  $-45^\circ$  (a), lo que para células solares de capa fina significa un signo positivo para la disipación de potencia (b). Por tanto se consume energía. En las demás 6 células la fase (a) se sitúa predominantemente a  $135^\circ$ , lo que corresponde a la generación de potencia (señal negativa en b). En el centro del defecto en las células primer, tercera y cuarta desde arriba la señal es positiva.

A continuación se describen los fundamentos matemáticos para la luminiscencia. La emisión de luminiscencia local  $\phi_{em}$  de una célula solar bajo iluminación y con una tensión aplicada localmente  $V$  se describe mediante [U. Rau, IEEE J. Photovoltaics 2, 169-172 (2012)]

$$\phi_{em} = Q_e \phi_{bb} \exp\left(\frac{V}{V_{th}}\right) + \phi_{sc} \quad (3)$$

donde  $Q_e$  designa el rendimiento cuántico local,  $\phi_{bb}$  la emisión espectral de un cuerpo negro a la temperatura de la célula,  $V$  la tensión local en cada posición en la célula solar,  $V_{th}$  la tensión térmica y  $\phi_{sc}$  la emisión de fotoluminiscencia de la célula en condiciones de cortocircuito. La señal detectada fotográficamente  $S_{cam}$  se produce por tanto en

$$S_{cam}(V) = \int Q_{cam} Q_e \phi_{bb} dE \exp\left(\frac{V}{V_{th}}\right) + \int \phi_{sc} dE = S_0 \exp\left(\frac{V}{V_{th}}\right) + S_{sc} \quad (4)$$

donde  $Q_{cam}$  designa el rendimiento cuántico (sensibilidad espectral) del sistema de cámara. La señal detectada consta por tanto de una parte dependiente de la tensión y de una parte no dependiente de la tensión. Esta última se intensifica además por reflexiones difícilmente evitables de la luz de excitación. La tensión local  $V$  es en este caso

una función de la tensión  $V_{ext}$  externa aplicada en el elemento constructivo. Mediante cálculo de la diferencia o tecnología *lock-in* obtenemos la señal de diferencia

$$L_{cam}(V(V_{ext,2})) = S_{cam}(V(V_{ext,2})) - S_{cam}(V(V_{ext,1} \leq 0)) \approx S_0 \exp\left(\frac{V(V_{ext,2})}{V_{th}}\right) \quad (5)$$

entre los dos puntos de funcionamiento externos  $V_{ext,1}$  y  $V_{ext,2}$  eligiéndose  $V_{ext,1}$  de tal modo que la señal reducida en tensión correspondiente señal según la ecuación (4) es despreciable con respecto a la señal a  $V_{ext,1}$ . Esto se consigue en la mayoría de los casos mediante  $V_{ext,1} = 0$  (cortocircuito). En casos extremos son necesarias sin embargo tensiones previas negativas. La ecuación (5) elimina la contribución independiente de la tensión de la ecuación (4).

En la segunda etapa se estudia una pequeña variación  $\Delta V_{klein}$  de la tensión aplicada en los contactos externos en una tensión de desviación constante  $V_b = V_{ext,2}$ . Usamos aquí en primer lugar la primera derivada (diferencial)

$$\frac{d}{dV_{ext}} S_{cam} = S'_{cam} = \frac{dV}{dV_{ext}} \frac{S_0}{V_{th}} \exp\left(\frac{V(V_b)}{V_{th}}\right). \quad (6)$$

Para variaciones muy pequeñas pero finitas de la tensión  $\Delta V_{klein}$ , el cociente de las diferencias se transforma en el cociente diferencial y se obtiene a partir de las ecuaciones (5) y (6) la señal de diferencia o *lock-in*

$$\frac{\Delta I_{cam}(V_b)}{\Delta V_{klein}} \approx \frac{\Delta V}{\Delta V_{klein}} \frac{S_0}{V_{th}} \exp\left(\frac{V(V_b)}{V_{th}}\right). \quad (7)$$

El cociente de las ecuaciones (7) y (5)

$$\frac{\Delta I_{cam}}{\Delta V_{klein}} \frac{1}{L_{cam}} = \frac{\Delta V}{\Delta V_{klein}} \frac{1}{V_{th}} \quad (8)$$

es, finalmente, proporcional a la variación local  $\Delta V$  de la tensión de diodo aplicada en la superficie local de la célula. Una reorganización de la ecuación (8) muestra cómo a partir de las magnitudes medidas  $\Delta I_{cam}$  y  $L_{cam}$  así como a partir de las magnitudes conocidas  $\Delta V_{klein}$  y  $V_{th}$  puede determinarse la relación

$$\frac{\Delta V}{\Delta V_{klein}} = \frac{\Delta I_{cam}}{\Delta V_{klein}} \frac{V_{th}}{L_{cam}}. \quad (9)$$

La relación  $\Delta V/\Delta V_{klein}$ , es decir entre la variación de tensión local  $\Delta V$  y la variación de la tensión aplicada desde fuera  $\Delta V_{klein}$  puede interpretarse [J. Wong, M. A. Green, Phys. Rev. B 85, 235205 (2012)] como la eficiencia de colección de corriente local

$$f = \frac{\Delta I_{klein}}{\Delta I} = \frac{\Delta V}{\Delta V_{klein}} = \frac{\Delta I_{cam}}{\Delta V_{klein}} \frac{V_{th}}{L_{cam}}. \quad (10)$$

La eficiencia de colección de corriente  $f$  es en cualquier caso un valor entre cero (ninguna actividad fotovoltaica local, es decir una corriente fotoeléctrica local adicional  $\Delta I$  no conduce a una corriente adicional  $\Delta I_{klein}$  en los contactos) y uno (actividad fotovoltaica local perfecta, es decir una corriente fotoeléctrica local adicional  $\Delta I$  conduce a una corriente adicional  $\Delta I_{klein}$  en los contactos con  $\Delta I_{klein} = \Delta I$ ) y puede usarse directamente como característica de calidad local.

Una posibilidad de interpretación adicional interesante se obtiene a partir del balance de potencia de la célula solar, del módulo o de la instalación. La potencia extraída  $P_{ext}$  se calcula a partir del producto de la tensión externa y de la corriente externa. Esta última se compone de la corriente fotoeléctrica  $I_{ph}$  y de la corriente oscura  $I_D$ . Es válido que

$$P_{ext} = (I_{ph} - I_D) V_{ext}. \quad (11)$$

Una variación pequeña  $\Delta V_{klein}$  de la tensión externa y una variación pequeña  $\Delta I_{ph}$  de la corriente fotoeléctrica conducen a una variación de la potencia extraída según

$$\Delta P_{ext} = \left( I_{ph} - I_D - \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{klein}} V_{ext} \right) \Delta V_{klein} + V_{ext} \Delta I_{ph} \quad (12)$$

5 usando el diferencial total de  $P_{ext} = P_{ext}(I_{ph}, V_{ext})$ .

10 Puesto que la variación global de la corriente fotoeléctrica se obtiene a partir de la suma (o la integral) de las contribuciones locales de la corriente fotoeléctricas, a una tensión  $V_{ext}$  constante para la variación de potencia es válido que

$$\Delta P_{ext} \Big|_{V_{ext}=konst.} = V_{ext} \Delta I_{ph} = V_{ext} \int \Delta j_{ph} dA = V_{ext} \Delta I \int f dA \quad (13)$$

15 en el caso de una generación de corriente fotoeléctrica adicional  $\Delta I$ . Asimismo desaparece en el punto de máxima extracción de potencia el término entre paréntesis en la ecuación (12), de modo que para la variación de la máxima potencia extraíble es válido que

$$\Delta P_{max} = V_{mpp} \Delta I_{ph} = V_{mpp} \int \Delta j_{ph} dA = V_{mpp} \Delta I \int f dA. \quad (14)$$

20 Por tanto, la probabilidad de colección  $f$  también cuantifica la contribución local a la variación de potencia [ecuación (13)] en cualquier punto de tensión, o la contribución local a la variación de la potencia máxima [ecuación (14)], en caso de que el elemento constructivo se haga funcionar a su punto de máxima potencia. Por tanto, en estas condiciones de funcionamiento, la representación de  $f$  según los métodos descritos tiene una relevancia directa que puede interpretarse fácilmente.

25 Mediante una integración de  $f$  por una superficie de célula, módulo o instalación puede determinarse entonces directamente la calidad fotovoltaica de los (sub)componentes fotovoltaicos en cuestión.

Modo de proceder:

30 En primer lugar se determina la curva característica de corriente-tensión del elemento constructivo (véase la figura 3). Una primera medición de luminiscencia diferencial (señal fuerte en la figura 4a) se genera mediante tomas cambiantes a una tensión  $V_0 = V_{ext,1} \leq 0$  V y a la tensión de desviación  $V_b = V_{ext,2}$ . La imagen 1 aparece mediante el cálculo de la diferencia por píxeles  $L_i = \sum n [S_{i,n}(V_b) - S_{i,n}(V_0)]/n$ ,  $i = 1 \dots$  número de píxeles,  $n = 1 \dots$  número de periodos. Mediante este modo de proceder se suprime la luminiscencia adicional  $\phi_{sc}$  (véase la ecuación (1) y la figura 3). La tensión de desviación  $V_b$  puede corresponder en particular a la tensión  $V_{mpp}$  pero también a otras tensiones. Una segunda medición de luminiscencia (señal débil en la figura 4b) se genera mediante variación de la tensión aplicada entre dos puntos de tensión  $V_{ext,3} = V_b - \Delta V_{klein/2}$  y  $V_{ext,4} = V_b + \Delta V_{klein/2}$  (véase la figura 3). La imagen 2 aparece mediante el cálculo de la diferencia por píxeles  $\Delta I_i = \sum n [S_{i,n}(V_2) - S_{i,n}(V_1)]/n$ . Las tomas 1 y 2 se toman con la misma sensibilidad de cámara, tiempo de exposición y número de periodos, de modo que ambas tomas son cuantitativamente comparables. La probabilidad de colección (ilustración 4c) viene dada entonces por la ecuación (10).

45 Un modo de proceder alternativo usa solo los puntos de tensión  $V_0$ ,  $V_1$  y  $V_2$ . La señal  $S_i(1)$  se calcula entonces mediante  $L_i = \sum n \{ [S_{i,n}(V_2) + S_{i,n}(V_1)]/2 - S_i(V_0) \}/n$ , la señal  $\Delta I_i(2)$  como de costumbre.

50 Las figuras 4 muestran una representación de la imagen de señal fuerte (figura 4a)  $L_{cam}$  y (figura 4b) de la imagen de señal débil  $\Delta L_{cam}$  de una célula solar de silicio dañada. La figura 4c muestra la diferencia de colección  $f$  determinada a partir de las imágenes (figura 4a) y (figura 4b) según la ecuación (10). Propiedades locales que corresponden al prefactor  $S_0$  en la ecuación (5) y la ecuación (7), como por ejemplo líneas de dislocación o diferencias entre granos individuales, pueden verse aún en (figura 4a) y (figura 4b), mientras que la figura 4c solo representa todavía la probabilidad de colección. Valores próximos a uno muestran propiedades casi perfectas de la colección de corriente, mientras que valores gris oscuro indican una mala colección de potencia.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para un control de la calidad de una célula solar con las siguientes etapas:

- 5 - en una célula solar se aplica una primera tensión ( $V_1$ ) menor o igual a cero y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una primera imagen;
- en la célula solar se aplica una segunda tensión ( $V_2$ ) mayor de cero y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una segunda imagen;
- 10 - en la célula solar se aplica una tercera tensión ( $V_3$ ) mayor de cero y menor que la segunda tensión y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una tercera imagen;
- en la célula solar se aplica una cuarta tensión ( $V_4$ ) mayor que la segunda y/o tercera tensión y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una cuarta imagen;
- se calcula una primera diferencia (D1) entre los valores de píxel de las fotografías a la primera y segunda tensión; y
- 15 - se calcula una segunda diferencia (D2) entre las imágenes correspondientes a la tercera y cuarta tensión; y
- se calcula el cociente entre la primera y la segunda diferencia.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la diferencia entre la cuarta y la segunda tensión (cuarta tensión - segunda tensión) es menor que la segunda tensión y, en concreto, preferiblemente varias veces menor y/o en el que la diferencia entre la segunda y la tercera tensión (segunda tensión - tercera tensión) es menor que la segunda tensión y, en concreto, preferiblemente varias veces menor.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la diferencia entre la cuarta y la segunda tensión (cuarta tensión - segunda tensión) asciende, en referencia a una única célula solar, a menos de 0,1 voltios, preferiblemente a menos de 0,01 voltios y/o en el que la diferencia entre la segunda y la tercera tensión (segunda tensión - tercera tensión) asciende a menos de 0,1 voltios, preferiblemente a menos de 0,01 voltios.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se realizan una o varias etapas de normalización, que tienen como consecuencia que a partir del cálculo del cociente se obtienen valores de 0 a 1.

5. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que se multiplican valores del cociente por la tensión térmica y a continuación se divide por la diferencia de tensión de la tercera y cuarta toma.

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se saca el promedio de los valores que se obtienen como resultado a partir del cálculo del cociente para todos los píxeles.

7. Procedimiento para un control de la calidad de una célula solar con las siguientes etapas:

- 40 - en una célula solar se aplica una primera tensión ( $V_1$ ) menor o igual a cero y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una primera imagen;
- en la célula solar se aplica una segunda tensión ( $V_2$ ) mayor de cero y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una segunda imagen;
- en la célula solar se aplica una tercera tensión ( $V_3$ ) mayor de cero y menor que la segunda tensión y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una tercera imagen;
- 45 - en la célula solar se aplica una cuarta tensión ( $V_4$ ) mayor que la segunda y/o tercera tensión y se fotografía la luz emitida de la célula solar, para obtener así una cuarta imagen;
- como segunda tensión ( $V_2$ ) se selecciona el punto de máxima extracción de potencia,
- y se sustrae por píxeles la imagen perteneciente a la primera tensión ( $V_1$ ) de la imagen correspondiente a la segunda tensión ( $V_2$ ) o de una imagen que se determina como valor promedio de la tercera y cuarta imagen, para obtener una primera imagen diferencial (D1);
- 50 - se calcula el valor promedio (M) de los píxeles de esta imagen diferencial;
- se sustrae por píxeles la imagen correspondiente a la tercera tensión ( $V_3$ ) de la imagen correspondiente a la cuarta tensión ( $V_4$ ), para obtener una segunda imagen diferencial (D2);
- se dividen los valores de la segunda imagen diferencial por el valor promedio determinado.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la célula solar se ilumina con luz con intensidad luminosa constante.

9. Procedimiento según una de las dos reivindicaciones anteriores, en el que se registra una curva característica de tensión, para determinar así el punto de potencia máximo de una célula solar que ha de evaluarse.

10. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que la medición de luminiscencia por medio de un sistema de cámaras se realiza bajo la condición de que (1) la célula solar se encuentra bajo una excitación luminosa externa artificial o natural, (2) la tensión aplicada en la célula solar en una primera medición de un valor menor o igual a cero se modula al valor de una tensión positiva discrecional  $V_b$  y se genera una imagen mediante cálculo de la diferencia o mediante tecnología *lock-in*, (3) en una segunda medición la tensión se varía

simétricamente, con una diferencia del 20 % o menos, en la tensión ( $V_b$ ) y se genera una imagen mediante cálculo de la diferencia o mediante tecnología *lock-in*.

5 11. Procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores, en el que se aplica una tecnología *lock-in* para realizar un procedimiento termográfico en lugar de un procedimiento por luminiscencia.

12. Procedimiento según la reivindicación anterior, según el cual el elemento constructivo se encuentra bajo iluminación constante y homogénea, artificial o natural, y se aplica un procedimiento termográfico en las condiciones de la reivindicación 2.

10 13. Procedimiento según la reivindicación anterior, en el que se aplica un procedimiento termográfico en las condiciones de las reivindicaciones 9 y 10.

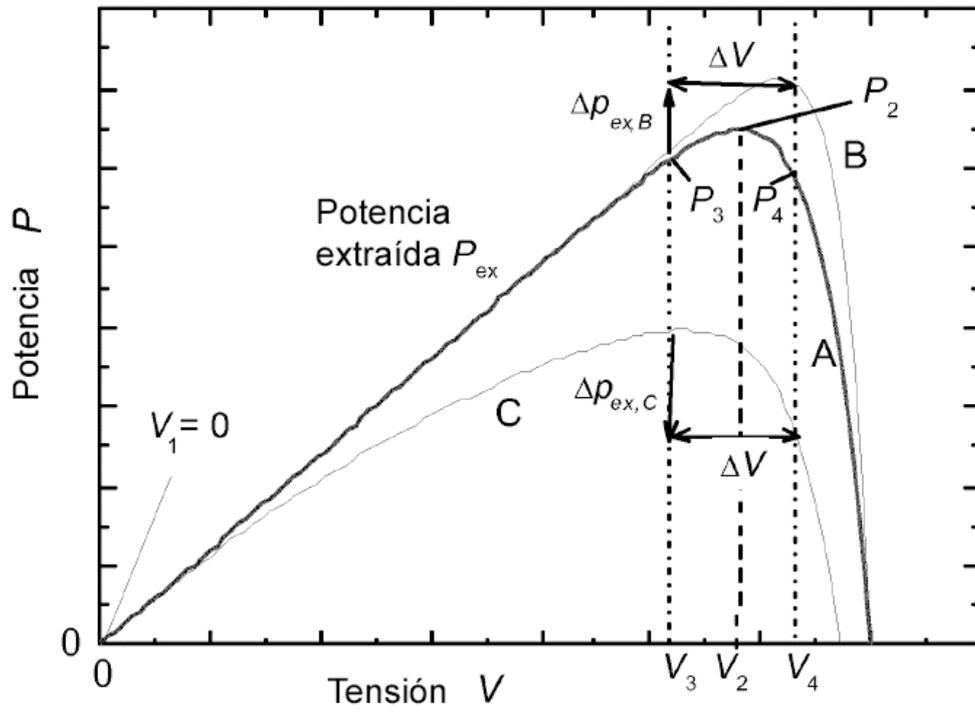


FIG. 1

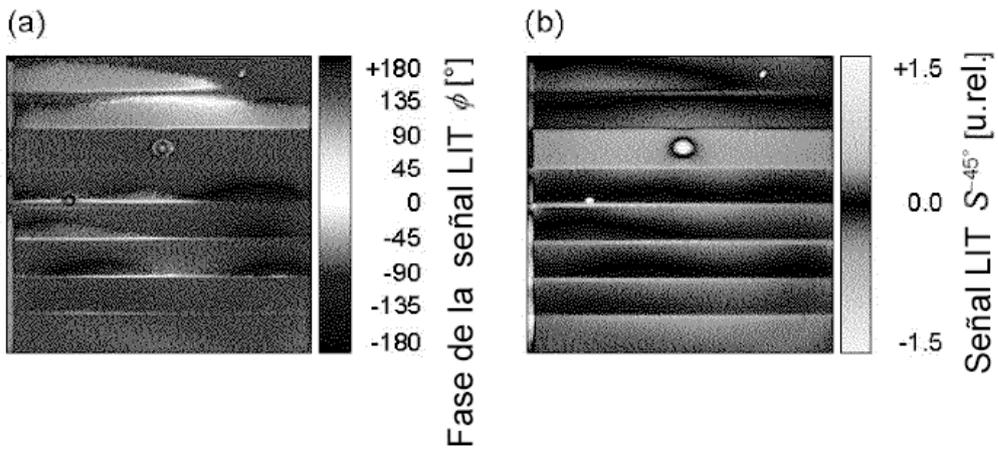
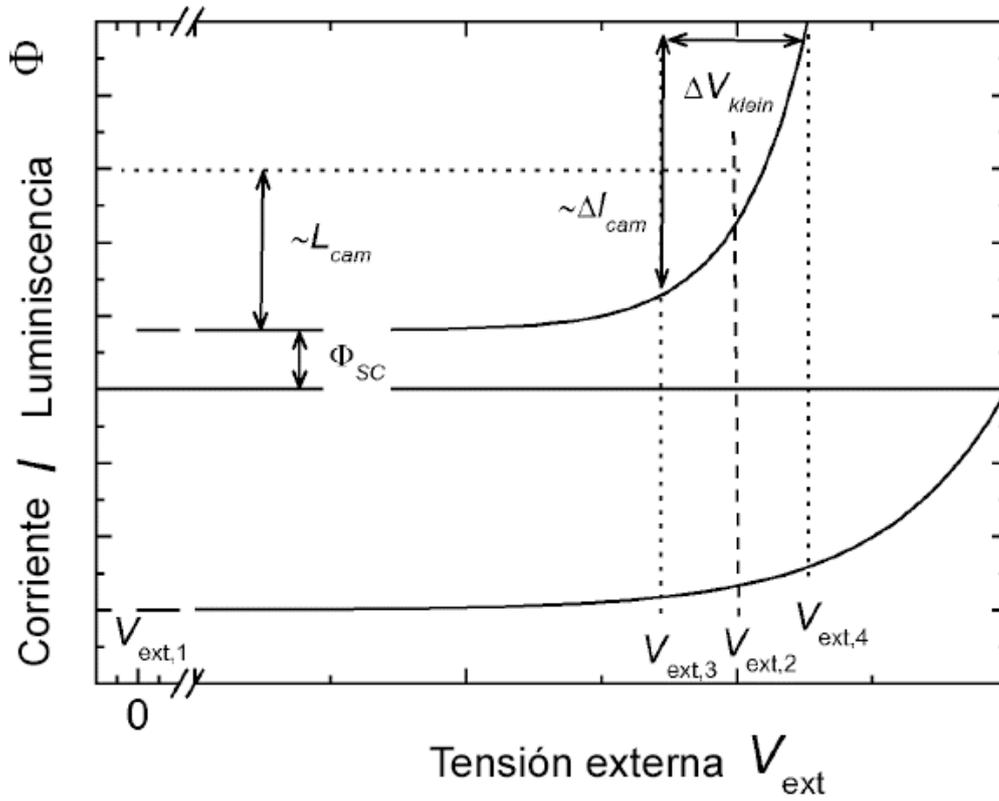


FIG. 2



**FIG. 3**

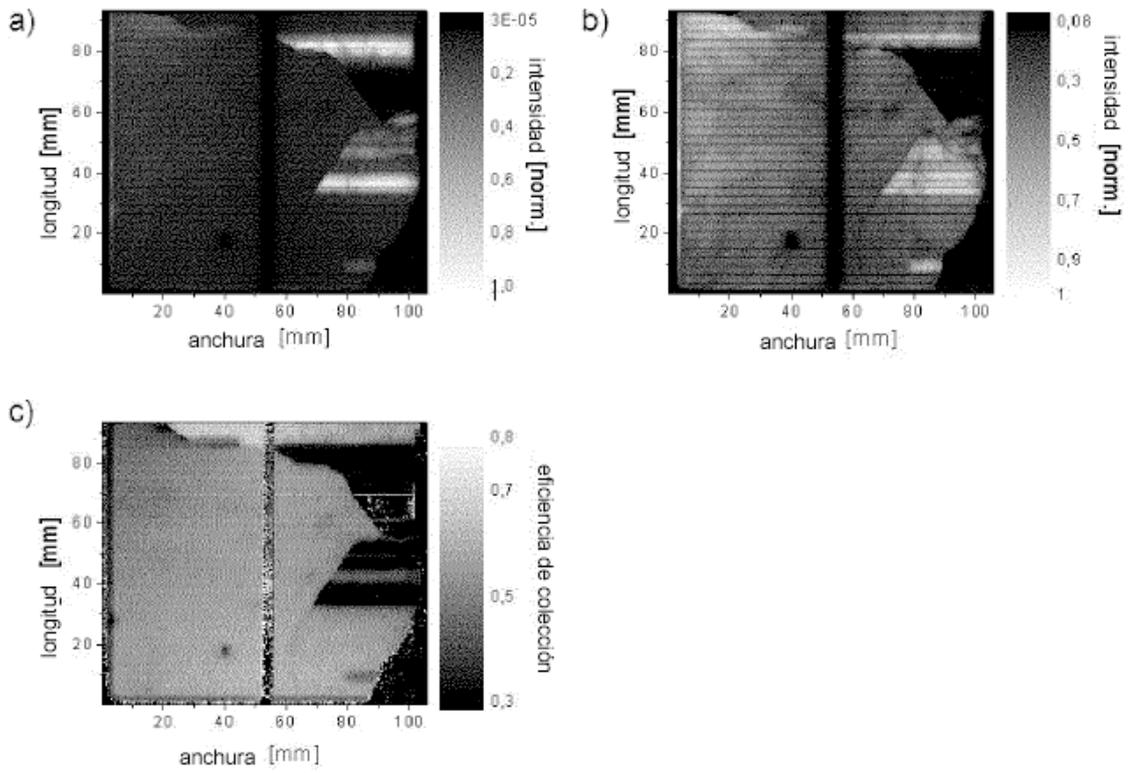


FIG. 4