

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la
Propriété Intellectuelle
Bureau international



(10) Numéro de publication internationale
WO 2020/025625 A1

(43) Date de la publication internationale
06 février 2020 (06.02.2020)

(51) Classification internationale des brevets :

G06T 7/00 (2017.01) G01N 21/95 (2006.01)
G06T 7/33 (2017.01) H01L 21/66 (2006.01)
G01N 21/64 (2006.01) G01N 21/956 (2006.01)

(71) Déposant : COMMISSARIAT A L'ENERGIE
ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES
[FR/FR] ; 25 rue Leblanc, Bâtiment " Le Ponant D ", 75015
PARIS (FR).

(21) Numéro de la demande internationale :

PCT/EP2019/070522

(72) Inventeurs : DAHAN, Patrick-Jeremy ; CEA GRE-
NOBLE, 17, rue des Martyrs, 38054 GRENOBLE CEDEX
09 (FR). FAVRE, Wilfried ; CEA GRENOBLE, 17, rue
des Martyrs, 38054 GRENOBLE CEDEX 09 (FR). VA-
RACHE, Renaud ; CEA GRENOBLE, 17, rue des Mar-
tyrs, 38054 GRENOBLE CEDEX 09 (FR).

(22) Date de dépôt international :

30 juillet 2019 (30.07.2019)

(25) Langue de dépôt :

français

(26) Langue de publication :

français

(74) Mandataire : LEBKIRI, Alexandre ; Cabinet CAMUS
LEBKIRI, 25, Rue de Maubeuge, 75009 PARIS (FR).

(30) Données relatives à la priorité :

1857140 31 juillet 2018 (31.07.2018) FR

(81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre de
protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM, AO,
AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA,

(54) Title: ANALYSIS OF DEFECTS OF AT LEAST ONE TYPE FROM AMONG A PLURALITY OF TYPES OF DEFECTS BETWEEN AT LEAST TWO SAMPLES

(54) Titre : ANALYSE D'AU MOINS UN TYPE DE DEFAUTS PARMIS UNE PLURALITE DE TYPES DE DEFAUTS ENTRE AU MOINS DEUX ECHANTILLONS

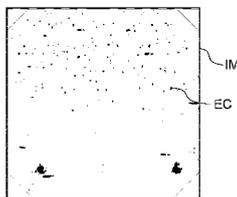


FIG. 2A

6	5	5	6	4	10	10	1
10	8	6	7	8	15	10	10
8	7	8	6	6	6	6	2
2	8	9	8	4	4	6	13
1	0	3	2	0	2	10	10
10	0	0	1	0	0	0	2
0	100	0	0	1	0	30	70
1	1	0	0	0	0	0	0

FIG. 2C

6	5	5	6	4	10	10	1
10	8	6	7	8	15	10	10
8	7	8	6	6	6	6	2
2	8	9	8	4	4	6	13
1	0	3	2	0	2	10	10
10	0	0	1	0	0	0	2
0	100	0	0	1	0	30	70
1	1	0	0	0	0	0	0

FIG. 2D

(57) Abstract: An aspect of the invention relates to a method of analysis of defects of at least one type from among a plurality of types of defects between at least two samples on the basis of an image of each sample characteristic of at least one type of defect from among said plurality of types of defects comprising: for each sample, a step (E1) of creating at least one minimap comprising a plurality of bins and representative of at least one type of defects from among the plurality of types of defects whose resolution is less than the image of the sample, each bin of the minimap being associated with a plurality of pixels of the image of the sample and having a score dependent on said pixels and representative of the quantity of at least one type of defects; a step of determining the distance between each minimap representing the same type or types of defects from among the plurality of types of defects, the distance between two minimaps being defined as the minimum distance between two minimaps by considering the following transformations: a rotation and/or a symmetry so that each distance between two minimaps is associated with a transformation. Moreover, the analysis of at least one type of defects from among the plurality of types of defects between at least two samples being performed by taking account of the transformation associated with the distance between each minimap representative of the at least one type of defects from among the plurality of types of defects.

(57) Abrégé : Un aspect de l'invention concerne un procédé d'analyse d'au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons à partir d'une image de chaque échantillon caractéristique d'au moins un type de défaut parmi ladite pluralité de types de défauts comprenant: pour chaque échantillon, une étape (E1) de création d'au moins une minicarte comprenant une pluralité de cases et représentative d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts dont la résolution est inférieure à l'image de l'échantillon, chaque case de la minicarte étant associée à une pluralité de pixels de l'image de l'échantillon et ayant un score fonction desdits pixels et représentatif de la quantité d'au



WO 2020/025625 A1

CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) États désignés (*sauf indication contraire, pour tout titre de protection régionale disponible*) : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasién (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), européen (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée:

— avec rapport de recherche internationale (Art. 21(3))

moins un type de défauts; une étape de détermination de la distance entre chaque minicarte représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts, la distance entre deux minicartes étant définie comme la distance minimale entre deux minicartes en considérant les transformations suivantes: une rotation et/ou une symétrie de sorte que chaque distance entre deux minicartes est associée à une transformation. De plus, l'analyse d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons étant effectuée en tenant compte de la transformation associée à la distance entre chaque minicarte représentative du au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts.

ANALYSE D'AU MOINS UN TYPE DE DEFAUTS PARMIS UNE PLURALITE DE TYPES DE DEFAUTS ENTRE AU MOINS DEUX ECHANTILLONS

DOMAINE TECHNIQUE DE L'INVENTION

5 Le domaine technique de l'invention est celui de l'analyse des défauts dans un constituant d'un dispositif, par exemple une cellule photovoltaïque. La présente invention concerne un procédé d'analyse d'au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons. La présente invention concerne également un dispositif permettant la mise en œuvre du

10 procédé.

ARRIERE-PLAN TECHNOLOGIQUE DE L'INVENTION

Lors de la fabrication en série de pièces ou de dispositifs, il est important de pouvoir analyser les défauts desdites pièces ou desdits dispositifs et de comparer la position et le type de défauts entre différents échantillons prélevés sur la ligne de production

15 ou bien encore mesurés lors de la production. Par exemple dans le cas des cellules photovoltaïques, de nombreux facteurs peuvent influencer l'homogénéité des cellules au niveau de leur surface : des contaminants laissés par la manipulation des plaquettes semi-conductrices, des inhomogénéités dans les procédés de fabrication, etc. Par exemple, durant leur fabrication, les cellules photovoltaïques

20 sont soumises à des manipulations qui peuvent conduire à une dégradation de la surface des cellules entraînant une détérioration des performances. De telles détériorations peuvent notamment être identifiées à l'aide d'images de photoluminescence ou d'électroluminescence.

La demande de brevet WO2015/091895 présente un procédé dans lequel une telle

25 caractérisation est proposée. Pour cela, une première étape consiste à acquérir une image de photoluminescence d'un échantillon à examiner. Cette image subit ensuite une étape de nettoyage lors de laquelle les motifs métalliques sont retirés puis une étape de division. A l'issue de l'étape de division, deux images ont été créées : une

première image contenant les basses fréquences correspondant aux variations lentes de l'image de départ et une deuxième image contenant les hautes fréquences (et correspondant aux défauts susceptibles d'être introduits lors de la fabrication). Ces deux images sont ensuite utilisées pour produire une métrique des défauts. Ce

5 procédé permet donc d'effectuer un suivi des défauts lors de la fabrication mais présente cependant des inconvénients. Le premier de ces inconvénients provient de la métrique obtenue. Si cette dernière permet de caractériser le niveau de défaut d'un échantillon, aucune information spatiale sur lesdits défauts n'est préservée lors

10 du traitement des images. Il est donc impossible à l'aide de ce procédé d'extraire une information en ce qui concerne la position des défauts. De plus, si l'on souhaite comparer des échantillons entre eux, cette comparaison doit se faire à l'aide d'au moins une des deux images. Or la comparaison entre deux images peut être compliquée du fait du grand nombre de pixels les composant. De plus, une telle

15 comparaison se fait de pixel à pixel ce qui ne permet pas de prendre en compte de légères différences dans la position des défauts d'un échantillon à l'autre. D'autre part, lorsque le nombre d'images à comparer est grand, cette comparaison nécessite une grande puissance de calcul. En outre, tous les échantillons ne sont pas manipulés de manière identique ce qui peut conduire à la présence de défauts définis à une rotation et/ou à une symétrie près.

20 Il existe donc un besoin d'un procédé qui s'affranchisse des inconvénients ci-dessus. En particulier il existe un besoin d'un procédé qui permette une comparaison des défauts entre plusieurs échantillons tout en conservant une information spatiale sur lesdits défauts et sans que cette comparaison ne soit affectée par les manipulations pseudo aléatoires desdits échantillons.

25 **RESUME DE L'INVENTION**

L'invention offre une solution aux problèmes évoqués précédemment, en permettant de prendre en compte non seulement l'aspect spatial des défauts mais également les différentes manipulations que peuvent subir les échantillons au cours de leur fabrication.

Un premier aspect de l'invention concerne un procédé d'analyse d'au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons à partir d'une image de chaque échantillon caractéristique d'au moins un type de défauts parmi ladite pluralité de types de défauts. Le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend :

- pour chaque échantillon, une étape de création d'au moins une matrice, appelée minicarte, comprenant une pluralité de cases et représentative d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts et dont la résolution est inférieure à l'image de l'échantillon, chaque case de la minicarte étant associée à une pluralité de pixels de l'image de l'échantillon et ayant un score fonction desdits pixels et représentatif de la quantité d'au moins un type de défauts ;
- une étape de détermination de la distance entre chaque minicarte représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts, la distance entre deux minicartes étant définie comme la distance minimale entre deux minicartes en considérant les transformations suivantes : une rotation et/ou une symétrie, de sorte que chaque distance entre deux minicartes est associée à une transformation.

De plus, l'analyse d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons est effectuée en tenant compte de la transformation associée à la distance entre chaque minicarte représentative du au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts.

Grâce à l'invention, il devient possible de comparer des défauts entre plusieurs échantillons tout en conservant une information spatiale sur lesdits défauts et sans que cette comparaison ne soit affectée par les manipulations affectant de manière pseudo aléatoire les échantillons en question. De plus, la résolution des minicartes étant inférieure à la résolution de l'image, l'analyse ne nécessite qu'une durée de calcul courte. Dans la suite, on entend par défauts les défauts de l'échantillon apparaissant sur l'image. Donc, la mention de défauts ou de type de défauts fait référence, non pas au défaut ou au type de défauts lui-même mais à sa manifestation dans l'image. Par exemple, dans le cas d'une image par

photoluminescence ou électroluminescence, un défaut pourra être défini comme une zone de l'image dont l'intensité est inférieure à un pourcentage donné de l'intensité maximale de l'image, ou l'intensité maximale locale de l'image. Ce pourcentage seuil pourra par exemple être fixé à 20%, et le maximum local associé
5 à une zone pourra par exemple être pris sur un carré de côté un dixième de la largeur de l'image entourant ladite zone.

Outre les caractéristiques qui viennent d'être évoquées dans le paragraphe précédent, le procédé selon un premier aspect de l'invention peut présenter une ou plusieurs caractéristiques complémentaires parmi les suivantes, considérées
10 individuellement ou selon toutes les combinaisons techniquement possibles.

Dans un mode de réalisation, l'étape de création d'une minicarte comprend :

- une première sous-étape de création d'une grille, la grille ayant une résolution de $N \times N$ carreaux où $N \times N$ est la résolution de la minicarte à déterminer, le centre de la grille étant aligné sur le centre de l'image et la
15 grille recouvrant entièrement ladite image ;
- une sous-étape de calcul pour chaque carreau de la grille d'un score fonction des pixels de l'image recouverts par ledit carreau, le score de chaque carreau de la grille étant attribuée à la case de la minicarte correspondante.

De manière alternative, l'étape de création d'une minicarte comprend :

- 20 – une première sous-étape de création d'une première grille intermédiaire, la première grille intermédiaire ayant une résolution de $N \times N$ carreaux où $N \times N$ est la résolution de la minicarte, le centre de la première grille intermédiaire étant aligné sur le centre de l'image et la première grille intermédiaire recouvrant entièrement ladite image ;
- 25 – une deuxième sous-étape de création d'une deuxième grille intermédiaire, la deuxième grille intermédiaire ayant une résolution de $(N - 1) \times (N - 1)$ carreaux, les dimensions des carreaux de la deuxième grille intermédiaire étant égales aux dimensions des carreaux de la première grille intermédiaire, le centre de la deuxième grille étant aligné sur le centre de l'image ;

- une troisième sous-étape de calcul pour chaque carreau de la première grille intermédiaire et de la deuxième grille intermédiaire d'un score fonction des pixels de l'image recouverts par lesdits carreaux ;
- une quatrième sous-étape de calcul du score de chaque case de la minicarte, le score d'une case étant égal à la somme pondérée du score du carreau de la première grille intermédiaire associé à ladite case et de la ou des carreaux de la deuxième grille intermédiaire recouvrant le carreau de la première grille intermédiaire considéré.

10 Ainsi, il est possible de prendre en compte de légères rotations des défauts entre différents échantillons. Cette méthode de création est particulièrement adaptée lorsque le score est déterminé par une métrique non-linéaire.

Dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend une étape de détermination d'une quantité de défaut maximum, ladite quantité étant associée à une valeur du score, dite valeur haute de référence.

15 Ainsi, Il est possible de construire deux visualisations : une visualisation absolue, dans laquelle les valeurs du score supérieures à la valeur haute de référence sont ramenées à la valeur haute de référence (saturation), et une visualisation relative où la minicarte est affichée avec son score minimum ramené à zéro et son score maximum à 100 (cent).

20 Dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend, avant l'étape de création d'au moins une minicarte, pour chaque échantillon, une étape d'application d'un masque sur l'image de l'échantillon, l'étape de création d'au moins une minicarte étant réalisée en tenant compte de la présence du masque.

25 Ainsi, lors de la création des minicartes, il est possible d'exclure certaines parties de l'image relatives à une zone ne correspondant pas à l'échantillon et/ou à une zone de l'échantillon que l'on ne souhaite pas prendre en compte, comme les bords de l'échantillon.

Dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend, avant l'étape de création d'au moins une minicarte, une étape de filtrage de l'image de l'échantillon.

5 Cette étape de filtrage permet de créer une minicarte relative à une partie seulement des types de défauts de la pluralité de types de défauts, voire à un unique type de défauts de la pluralité de types de défauts.

Dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend une étape de superposition des minicartes représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts, ladite superposition se
10 faisant en fonction de la distance séparant lesdites minicartes et en tenant compte de la transformation associée à ladite distance de sorte à obtenir au moins une minicarte résultante.

On entend par minicarte résultante une minicarte obtenue par la superposition d'au moins deux minicartes. Ainsi, il est permis de comparer les minicartes issues de
15 différents échantillons y compris lorsque les échantillons en question ont subi des étapes de manipulation différentes.

Dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend une étape de superposition des images, ladite superposition se faisant en fonction de la distance séparant les minicartes représentant le ou les mêmes
20 types de défauts parmi la pluralité de types de défauts et associée à chaque image, et en tenant compte de la transformation associée à ladite distance de sorte à obtenir au moins une image résultante.

On entend par image résultante une image obtenue par la superposition d'au moins deux images. Ainsi, il est permis de comparer les images issues de différents
25 échantillons y compris lorsque les échantillons en question ont subi des étapes de manipulation différentes, et ce grâce aux informations apportées par les minicartes et la distance qui les sépare entre elles.

Un deuxième aspect de l'invention concerne un procédé de fabrication de cellules photovoltaïques comprenant au moins une étape d'analyse d'au moins deux

échantillons à partir d'une image par photoluminescence ou électroluminescence de chaque échantillon comportant au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts à l'aide d'un procédé selon un premier aspect de l'invention.

Un troisième aspect de l'invention concerne un dispositif comprenant les moyens
5 pour mettre en œuvre un procédé selon un premier aspect ou un deuxième aspect de l'invention.

Un quatrième aspect de l'invention concerne un programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre le procédé selon un premier
10 aspect ou un deuxième aspect de l'invention.

Un cinquième aspect de l'invention concerne un support de données lisible par ordinateur, sur lequel est enregistré le programme d'ordinateur selon un quatrième aspect de l'invention.

L'invention et ses différentes applications seront mieux comprises à la lecture de la
15 description qui suit et à l'examen des figures qui l'accompagnent.

BREVE DESCRIPTION DES FIGURES

Les figures sont présentées à titre indicatif et nullement limitatif de l'invention.

- La figure 1 montre un logigramme d'un procédé selon un premier aspect de l'invention.
- 20 – La figure 2 montre une représentation schématique de la construction d'une minicarte dans un mode de réalisation d'un procédé selon un premier aspect de l'invention.
- La figure 3 montre une représentation schématique de deux grilles intermédiaires dans un mode de réalisation d'un procédé selon un premier
25 aspect de l'invention.
- La figure 4 montre une représentation schématique de l'utilisation d'un masque dans un mode de réalisation d'un procédé selon un premier aspect de l'invention

DESCRIPTION DETAILLEE D'AU MOINS UN MODE DE REALISATION DE L'INVENTION

Sauf précision contraire, un même élément apparaissant sur des figures différentes présente une référence unique.

- 5 Un mode de réalisation d'un premier aspect de l'invention illustré à la figure 1 concerne un procédé d'analyse d'au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons EC à partir d'une image IM de chaque échantillon EC caractéristique d'au moins un type de défauts parmi ladite pluralité de types de défauts. Pour rappel, on entend par défauts les défauts de
- 10 l'échantillon EC apparaissant sur l'image IM. Donc, la mention de défauts fait référence, non pas au défaut lui-même, mais à sa manifestation dans l'image IM. Par exemple, dans le cas d'une image IM par photoluminescence ou électroluminescence, un défaut pourra être défini comme une zone de l'image IM dont l'intensité est inférieure à un pourcentage donné de l'intensité maximale de
- 15 l'image, ou l'intensité maximale locale de l'image. Ce pourcentage seuil pourra par exemple être fixé à 20%, et le maximum local associé à une zone pourra par exemple être pris sur un carré de côté un dixième de la largeur de l'image entourant ladite zone. De préférence, la géométrie des différents échantillons EC est comparable. On entend par comparable des échantillons EC dont le diamètre (ou
- 20 la largeur) est identique et dont la forme extérieure est similaire (déviations maximales de moins de 20 % du diamètre ou de la largeur). De préférence, les images IM des différents échantillons EC sont prises dans des conditions comparables. De préférence, lorsque les échantillons EC ont des géométries différentes, l'image IM concerne la zone maximale commune à l'ensemble des
- 25 échantillons EC. De manière générale, les différences de distance entre le système optique et l'échantillon EC, d'éclairement, de sensibilité du capteur d'image, de distorsion du chemin optique, peuvent être corrigés de sorte à ramener les images IM dans une condition d'acquisition effective équivalente. Les échantillons EC peuvent être des plaquettes (*wafer* en anglais) semi-conductrices
- 30 et les images IM peuvent être des images IM obtenues par électroluminescence ou photoluminescence. De telles images IM peuvent par exemple être acquises à l'aide

d'un procédé tel que décrit dans la demande de brevet WO2015/091895 déjà citée. Ainsi, pour chaque échantillon, une image IM est représentative d'une pluralité de types de défauts (par exemple, des traces de contaminants, des rayures, etc.). L'analyse selon l'invention peut porter sur tout ou partie de ces types de défauts.

5 Par exemple, dans le cas de plaquettes semi-conductrices on pourra s'intéresser à l'ensemble des défauts ou bien alors se concentrer sur un type donné de défauts, par exemple pour identifier un problème de manutention sur une ligne de production. Une telle image IM est illustrée à la figure 2A dans le cas d'une cellule photovoltaïque imagée à l'aide d'une technique de photoluminescence sur laquelle

10 les défauts sont visibles en noir. Comme cela sera détaillé dans la suite, la sélection d'une partie seulement des défauts pourra se faire par l'application d'un filtre sur l'image, ledit filtre étant fonction du type ou des types de défauts auxquels on s'intéresse.

Comme illustré aux figures 2B à 2D, le procédé selon un premier aspect de

15 l'invention comprend, pour chaque échantillon EC, une étape E1 de création d'au moins une minicarte MC comprenant une pluralité de cases et représentative d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts, et dont la résolution est inférieure à l'image IM de l'échantillon EC. De plus, chaque case de la minicarte MC est associée à une pluralité de pixels de l'image IM de l'échantillon EC

20 et a un score fonction desdits pixels, ledit score étant représentatif de la quantité d'au moins un type de défauts.

La détermination d'une minicarte MC à partir d'une image IM peut se faire de plusieurs manières. Dans un mode de réalisation, la détermination de la minicarte comprend une première sous-étape E11 de création d'une grille GR. Cette grille GR

25 est composée de carreaux et a une résolution de $N \times N$ carreaux où $N \times N$ est la résolution de la minicarte MC que l'on souhaite déterminer. Autrement dit, à chaque carreau de la grille GR est associé une case de la minicarte MC et à chaque case de la minicarte MC est associé un carreau de la grille GR (autrement dit il existe une relation bijective entre les cases de la minicarte MC et les carreaux de la

30 grille GR). De plus, le centre de la grille GR est aligné sur le centre de l'image IM et la grille GR recouvre entièrement ladite image IM. Ainsi, chaque pixel de l'image IM

est recouvert par un carreau et chaque carreau recouvre une pluralité de pixels de l'image IM. Le procédé comprend ensuite une deuxième sous-étape E12 de calcul pour chaque carreau de la grille GR d'un score fonction des pixels de l'image IM recouverts par ledit carreau. Par exemple, comme déjà mentionné, si

5 l'image IM est une image IM de photoluminescence, le score associé à un carreau pourra être donné par la valeur moyenne de la luminescence des pixels contenus dans ledit carreau. Bien entendu, afin d'obtenir la minicarte MC, le score de chaque carreau de la grille GR est attribué à la case de la minicarte MC correspondante. Dans ce mode de réalisation, la grille GR est donc identique à la minicarte MC.

10 Cette manière de construire la minicarte MC a pour avantage d'être simple de mise en œuvre. Cependant, si un type de défauts prend la forme d'une ligne horizontale ou verticale sur un premier échantillon EC et la forme d'une ligne légèrement oblique sur un deuxième échantillon EC, cette manière de faire peut accentuer cette légère différence lorsqu'une partie de la ligne oblique passe d'une première ligne

15 (ou colonne) de carreaux à une deuxième ligne (ou colonne) de carreaux dans la grille GR.

Afin de limiter ce phénomène, il est possible d'utiliser non pas une grille GR mais deux grilles intermédiaires GR1, GR2. Plus particulièrement, dans un mode de réalisation illustré à la figure 3, l'étape de création d'une minicarte MC

20 comprend une première sous-étape E11' de création d'une première grille GR1 intermédiaire, la première grille GR1 intermédiaire (en trait plein sur la figure 3) ayant une résolution de $N \times N$ carreaux où $N \times N$ est la résolution de la minicarte MC, le centre de la première grille GR1 intermédiaire étant aligné sur le centre de l'image IM et la première grille GR1 intermédiaire recouvre entièrement

25 ladite image IM. Ainsi, chaque pixel de l'image IM est recouvert par un carreau de la première grille GR1 intermédiaire et chaque carreau de la première grille GR1 intermédiaire recouvre une pluralité de pixels de l'image IM. Comme dans le cas précédent, à chaque carreau de la première grille GR1 intermédiaire est associée une case de la minicarte MC et à chaque case de la minicarte MC est associé un

30 carreau de la première grille GR1 intermédiaire (autrement dit il existe une relation bijective entre les cases de la minicarte MC et les carreaux de la première grille GR1 intermédiaire). Le procédé comprend ensuite une deuxième sous-étape E12' de

création d'une deuxième grille GR2 intermédiaire (en trait pointillé sur la figure 3) avec une résolution de $(N - 1) \times (N - 1)$ carreaux, les dimensions des carreaux de la deuxième grille GR2 intermédiaire étant égales aux dimensions des carreaux de la première grille GR1 intermédiaire, le centre de la deuxième grille GR2 intermédiaire étant aligné sur le centre de l'image IM (et donc sur le centre de la première grille GR1 intermédiaire). Ainsi, chaque carreau de la deuxième grille GR2 intermédiaire recouvre une pluralité de pixels de l'image IM, en revanche tous les pixels de l'image IM ne sont pas recouverts par un carreau de la deuxième grille GR2 intermédiaire. Par construction, chaque carreau de la deuxième grille GR2 intermédiaire recouvre partiellement quatre carreaux de la première grille GR1 intermédiaire. Le procédé comprend ensuite une étape E13' de calcul pour chaque carreau de la première grille GR1 intermédiaire et de la deuxième grille GR2 intermédiaire d'un score fonction des pixels de l'image IM recouverts par lesdits carreaux. Par exemple, comme déjà mentionné, si l'image IM est une image de photoluminescence, le score associé à un carreau sera donné par la valeur moyenne de la luminescence des pixels contenus dans ledit carreau. Enfin, le procédé comprend une étape E14' de calcul du score de chaque case de la minicarte MC, le score d'une case étant égal à la somme pondérée du score du carreau de la première grille GR1 intermédiaire associé à ladite case et de la ou des carreaux de la deuxième grille GR2 intermédiaire recouvrant le carreau de la première grille GR1 intermédiaire considéré. Autrement dit, le score attribué à la case de la minicarte MC associée à un carreau de la première grille GR1 intermédiaire prend en compte le score de ce carreau mais également le ou les scores du ou des carreaux de la deuxième grille GR2 intermédiaire qui recouvrent le carreau de la première grille GR1 intermédiaire considéré. Dans un mode de réalisation, cette prise en compte est faite à l'aide de la somme pondérée suivante $S = \alpha(K)s_1 + \sum_{i=1}^K \beta(K)s_2^i$ où S est le score de la case considérée, K est le nombre de carreaux de la deuxième grille GR2 intermédiaire recouvrant le carreau de la première grille GR1 intermédiaire associée à la case de la minicarte MC dont on calcule le score, α est un coefficient de pondération dépendant de K , s_1 est le score du carreau de la première grille GR1 intermédiaire associée à la case dont on calcule le score, β est un coefficient de pondération dépendant de K et s_2^i est le

score du $i^{\text{ème}}$ carreau de la deuxième grille GR2 intermédiaire recouvrant le carreau de la première grille GR1 intermédiaire associée à la case considérée. Dans un mode de réalisation illustré à la figure 3, les coefficients de pondération sont fonctions de la surface de chaque carreau recouvrant la case de la minicarte MC, c'est-à-dire $\alpha(K) = 4/(4 + K)$ et $\beta(K) = \frac{1}{4+K}$.

De manière générale, dans la construction d'une fonction d'attribution de score, une calibration initiale est nécessaire. Le score minimum absolu est habituellement choisi comme étant égal à zéro et correspondant à aucun défaut, et le score maximum absolu est défini comme le score d'une région de l'image IM jugé comme extrêmement défectueuse, selon le type de défauts considéré. Cependant, cette définition expérimentale du score maximum absolu amène à des situations où ce score est dépassé lors de l'analyse d'échantillons EC mesurés par la suite. De plus, ce score maximum absolu ne peut pas toujours être relié à des propriétés physiques des défauts, ce qui rend sa vérification difficile (pour rappel, le mot défaut renvoie à la manifestation de ce dernier dans l'image IM de l'échantillon EC et ne nécessite donc pas de connaître l'origine physique du défaut). Afin de s'affranchir de cette difficulté, il est préférable que le score attribué à chaque case d'une minicarte MC soit un score sans limite supérieure absolue. Le score très élevé de la région jugée très défectueuse issue de l'image IM de calibration sera néanmoins utilisé comme valeur haute de référence pour les visualisations, par exemple fixée à 100. Il est alors possible de construire deux visualisations : une visualisation absolue, dans laquelle les valeurs du score supérieures à la valeur haute de référence sont ramenées à la valeur haute de référence (saturation), et une visualisation relative où la minicarte MC est affichée avec son score minimum ramené à zéro et son score maximum à 100. Autrement dit, dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend une étape de détermination d'une quantité de défaut maximum, ladite quantité étant associée à une valeur du score, dite valeur haute de référence.

L'image IM d'un échantillon EC n'adopte pas systématiquement le format de l'échantillon EC de sorte qu'une partie de cette image IM n'est pas représentative de l'échantillon EC. Cette situation est par exemple illustrée à la figure 4A où les

pixels situés dans les angles de l'image IM ne sont pas représentatifs de l'échantillon EC. De même, il peut être avantageux de ne pas prendre en compte certaines parties de l'image IM, comme par exemples les bords de l'échantillon EC qui constituent des zones particulières. Aussi, dans un mode de réalisation, le

5 procédé comprend, avant l'étape E1 de création d'au moins une minicarte MC, pour chaque échantillon EC, une étape E0 d'application d'un masque MS sur l'image IM de l'échantillon EC. Le masque MS correspondant à l'échantillon EC de la figure 4A est illustré à la figure 4B et comporte quatre zones correspondant chacun à un angle de l'échantillon EC. Une fois ledit masque MS appliqué sur l'image IM de

10 l'échantillon EC, l'étape E1 de création d'au moins une minicarte MC peut être réalisée en tenant compte de la présence du masque MS. Dans un mode de réalisation, le score d'une case d'une minicarte MC est établi en fonction des pixels de l'image IM qu'elle recouvre et qui ne sont pas recouvert par le masque MS, le score ainsi obtenu étant ensuite multiplié par le pourcentage de surface de la case

15 de la minicarte MC non recouverte par le masque MS. Par exemple, dans la figure 4C et la figure 4D, la case supérieure droite est recouverte à 50% par le masque MS, la zone recouverte par ledit masque MS correspondant à la zone ne contenant pas de pixel de l'image IM relatif à l'échantillon EC. Le score associé à cette case de la minicarte MC va être calculé en ne prenant en compte que les

20 pixels de l'image IM dans la zone non recouverte NR et le score ainsi obtenu va être ensuite divisé par le pourcentage de l'aire de la case de la minicarte MC que représente la partie non recouverte NP : ici 50%. Par exemple, si l'image IM est une image IM de photoluminescence, la luminescence moyenne va être calculée à partir des pixels de l'image IM correspondant à la partie de l'échantillon EC non

25 recouverte NR (c'est-à-dire sans prendre en compte les pixels de l'image IM recouvert R par le masque MS) puis la valeur moyenne ainsi obtenue va être multipliée par deux (c'est-à-dire divisée par 50%). On comprendra que le masque MS ainsi décrit peut également recouvrir des zones de l'image IM relatives à l'échantillon EC que l'on ne souhaite pas prendre en compte pour la détermination

30 de la ou des minicartes MC.

Dans un mode de réalisation, la résolution d'une minicarte MC est comprise entre 3×3 et 48×48 , de préférence égale à 16×16 . Bien entendu, la résolution peut

être adaptée à la taille de l'échantillon EC et à la résolution de l'image IM utilisée pour produire la minicarte MC. De manière plus générale, la résolution de la minicarte MC est fixée par les défauts eux-mêmes et plus particulièrement par la taille de ces derniers et par la translation possible de ces défauts entre deux échantillons EC. Par exemple, la résolution de la minicarte MC est choisie de sorte que la taille d'une case de la minicarte MC soit égale à la taille du défaut d'intérêt plus la translation possible dudit défauts d'un échantillon EC à l'autre. Par exemple, la valeur moyenne de ces deux propriétés calculées sur au moins deux échantillons, de préférence une pluralité d'échantillons, est utilisée pour définir la résolution de la minicarte MC.

Lorsque l'on souhaite obtenir une minicarte MC représentative de l'ensemble des défauts, l'image représentative desdits types de défaut peut être utilisée directement. En revanche, si l'image IM est caractéristique d'une pluralité de défauts et que l'on souhaite obtenir une minicarte MC qui ne s'intéresse qu'à un seul type de défauts ou une partie seulement des types de défauts, il est utile d'appliquer un filtre sur l'image avant d'effectuer l'étape E1 de création d'au moins une minicarte MC. Pour cela, dans un mode de réalisation, le procédé comprend, avant l'étape de E1 de création d'au moins une minicarte MC, une étape E0' de filtrage de l'image IM de l'échantillon, ledit filtre étant adapté en fonction du type ou des types de défauts auxquels on s'intéresse.

La première étape E1 qui vient d'être présentée en détail permet de pouvoir effectuer une analyse des défauts en conservant une information spatiale concernant lesdits défauts contrairement au procédé décrit dans la demande de brevet WO2015/091895. Cela permet également de comparer différents échantillons EC entre eux, ce qui n'est pas possible avec l'image IM correspondant auxdits échantillons EC. En effet, dans le cadre d'une image IM, la comparaison pixel à pixel ne donnerait pas de résultat probant du fait notamment que la position d'un défaut, même récurrent d'un échantillon EC à l'autre, peut varier de plusieurs pixels selon les échantillons EC. Il est intéressant pour la suite de noter qu'une minicarte MC peut être vue comme une image IM dans laquelle chaque case est associée à un pixel de l'image IM ou bien encore comme une matrice dans laquelle

chaque case est associée à un élément de matrice, la dimension de la matrice étant fonction de la résolution de la minicarte MC. Dans la suite, la représentation matricielle d'une minicarte MC d'un échantillon i sera notée MC_i .

Le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend également une

5 étape E2 de détermination de la distance entre chaque minicarte MC représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts. Il est important de noter que la distance entre deux minicartes MC n'a de sens que si les deux minicartes MC ont été produites avec les mêmes fonctions d'attribution de score. Aussi, comme cela est précisé, cette étape E2 de calcul de la distance n'est

10 réalisée qu'entre minicartes MC représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts. Comme déjà exposé, la position des défauts peut varier d'un échantillon EC à l'autre. En plus d'une variation légère en translation, cette variation peut également correspondre à une rotation ou une symétrie du fait par exemple d'une ou plusieurs étapes de manipulation de

15 l'échantillon EC. De plus, ces étapes de manipulation peuvent varier d'un échantillon EC à l'autre sur la chaîne de production. Pour pouvoir effectuer une comparaison efficace entre échantillon EC, il est donc essentiel de prendre également en compte cet aspect. Dans le procédé selon l'invention, cette prise en compte se fait par la définition de la distance entre deux minicartes MC. Plus

20 particulièrement, la distance entre deux minicartes MC est définie comme la distance minimale entre deux minicartes MC en considérant les transformations suivantes : une rotation et/ou une symétrie. Ainsi, chaque distance entre deux minicartes MC est associée à une transformation. La distance entre deux minicartes MC pourra par exemple être une distance euclidienne. Dans un mode de

25 réalisation, les transformations considérées comprennent une rotation de $n\frac{\pi}{2}$ avec n un entier et/ou une transformation miroir (dans la pratique on peut choisir $n \in [0,3]$). Ainsi, pour mesurer la distance entre deux minicartes MC, on calcule la distance entre les deux minicartes MC en appliquant une transformation sur l'une des deux minicartes MC, et ce pour chaque transformation énumérée ci-dessus,

30 puis on retient la distance la plus courte parmi les distances ainsi déterminées comme étant la distance séparant les deux minicartes MC. Il est donc possible

d'associer à chaque distance une transformation ayant permis d'obtenir ladite distance.

Une fois les distances entre minicartes calculées, l'analyse d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons EC est effectuée en tenant compte de la transformation associée à la distance entre chaque minicarte MC représentative du au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts.

Dans certains cas, il peut être avantageux de comparer visuellement différents échantillons EC vis-à-vis de tout ou partie de la pluralité de types de défauts. Une telle comparaison peut se faire au moyen de la ou des minicartes MC associées à chaque échantillon EC ou bien encore au moyen de l'image IM associée à chaque échantillon EC. Afin d'effectuer cette comparaison à l'aide d'une minicarte MC, dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend une étape de superposition des minicartes MC représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts, ladite superposition se faisant en fonction de la distance séparant lesdites minicartes MC et en tenant compte de la transformation associée à ladite distance, de sorte à obtenir au moins une minicarte MC résultante. On appelle minicarte MC résultante une minicarte MC obtenue par la superposition d'au moins deux minicartes MC.

Cette superposition peut par exemple être obtenue par un algorithme de regroupement hiérarchique, par exemple en utilisant une méthode dite Weighted Pair Group Method with Arithmetic Mean (ou WPGMA). Dans cet algorithme, une matrice Δ_0 représentant les distances séparant les minicartes MC considérées est constituée. Par exemple, si l'on suppose cinq minicartes MC chacune associée à un échantillon EC et représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts que les autres minicartes MC, la distance séparant lesdites minicartes MC peut être mise sous la forme matricielle Δ_0 suivante :

$$\Delta_0 = \begin{pmatrix} 0 & 5 & 12 & 23 & 19 \\ 5 & 0 & 42 & 22 & 12 \\ 12 & 42 & 0 & 9 & 43 \\ 23 & 22 & 9 & 0 & 22 \\ 19 & 15 & 43 & 22 & 0 \end{pmatrix}$$

Les deux minicartes MC les plus proches (dont les distances sont en gras dans la matrice) sont ensuite superposées, la superposition ainsi obtenue venant constituer une minicarte MC résultante remplaçant les deux minicartes MC ainsi superposées. Dans l'exemple ci-dessus, la distance la plus faible entre deux minicartes MC est 5 et les deux minicartes MC correspondantes sont superposées pour donner une minicarte MC résultante. D'un point de vue matriciel, superposer une première minicarte \mathbf{MC}_1 à une deuxième minicarte \mathbf{MC}_2 peut s'écrire sous la forme $\mathbf{MC}_{\text{res}} = \frac{1}{2}\mathbf{MC}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{MC}_2$ où \mathbf{MC}_{res} est la minicarte MC résultant de cette superposition. Les distances séparant cette minicarte MC résultante des autres minicartes MC est ensuite calculée de sorte à obtenir une nouvelle matrice Δ_1 des distances (les distances ayant été recalculées sont en gras et correspondent aux distances séparant la minicarte MC résultante qui vient d'être obtenue des autres minicartes MC) :

$$\Delta_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{30} & \mathbf{21} & \mathbf{17} \\ \mathbf{30} & 0 & 9 & 43 \\ \mathbf{21} & 9 & 0 & 22 \\ \mathbf{17} & 43 & 22 & 0 \end{pmatrix}$$

Dans un mode de réalisation, le processus est répété jusqu'à l'obtention d'une seule minicarte MC. Dans un mode de réalisation, le processus est répété jusqu'à l'obtention d'un nombre prédéfini de minicartes MC. Dans un mode de réalisation, le processus est répété jusqu'à que la distance séparant les deux minicartes MC les plus proches soit supérieure à un seuil prédéterminé. Bien entendu, chaque superposition est effectuée en tenant compte de la transformation associée à la distance séparant les deux minicartes MC à superposer. Autrement dit, si la distance entre une première minicarte MC et une deuxième minicarte MC est associée à une rotation de $\frac{\pi}{2}$ de la deuxième minicarte MC, alors la deuxième minicarte MC subira une rotation de $\frac{\pi}{2}$ avant d'être superposée à la première minicarte MC. De plus, à chaque minicarte MC résultante obtenue à partir de la superposition de deux ou plusieurs minicartes MC est associée un nombre correspondant au nombre de minicartes MC ayant été superposées pour obtenir ladite minicarte MC résultante. Ainsi, un coefficient adapté peut être utilisé lors de la superposition d'une minicarte MC résultante obtenue par superposition d'une

pluralité d'autres minicartes et une minicarte MC ne résultant d'aucune superposition. Par exemple, si une première minicarte \mathbf{MC}_{res1} obtenue par la superposition de trois autres minicartes MC est superposée à une deuxième minicarte \mathbf{MC}_2 ne résultant d'aucune superposition, la pondération associée à la première minicarte \mathbf{MC}_{res} sera de $\frac{3}{4}$ et la pondération associée à la deuxième minicarte \mathbf{MC}_2 sera de $\frac{1}{4}$ et la nouvelle minicarte \mathbf{MC}_{res2} obtenue par ladite superposition sera donnée par $\mathbf{MC}_{res2} = \frac{3}{4}\mathbf{MC}_{res1} + \frac{1}{4}\mathbf{MC}_2$. De manière plus générale la minicarte \mathbf{MC}_{tot} obtenue par la superposition d'une première minicarte \mathbf{MC}_{part1} correspondant à la superposition de i minicartes MC et d'une deuxième minicarte \mathbf{MC}_{part2} correspondant à la superposition de j minicartes MC est donnée par $\mathbf{MC}_{tot} = \frac{i}{i+j}\mathbf{MC}_{part1} + \frac{j}{i+j}\mathbf{MC}_{part2}$. De plus, la minicarte \mathbf{MC}_{tot} sera associée à un nombre de minicartes MC superposées égal à $i + j$. A l'issue du procédé, une ou plusieurs minicartes MC résultantes sont ainsi obtenues, ces dernières permettant une comparaison des différents types de défauts. Lorsque plusieurs minicartes MC résultantes sont obtenues (autrement dit qu'un « *clustering* » des échantillons EC a été réalisé), il est notamment possible d'examiner la distance séparant ces différentes minicartes MC résultantes. Cette distance peut notamment permettre d'évaluer l'hétérogénéité entre les différents échantillons EC. Plus particulièrement, si la distance entre une première minicarte MC et une deuxième minicarte MC est grande, alors l'hétérogénéité est entre les échantillons EC ayant permis d'obtenir la première minicarte MC et les échantillons EC ayant permis d'obtenir la deuxième minicarte MC est également importante. La réalisation de minicarte MC permet donc de regrouper les différents échantillons EC en fonction de l'homogénéité des défauts qui les affectent.

Comme cela a déjà été mentionné, il est également possible d'effectuer une comparaison des défauts entre échantillons EC à l'aide de l'image IM associée à chacun de ces échantillons EC. Pour cela, dans un mode de réalisation, le procédé selon un premier aspect de l'invention comprend une étape de superposition des images IM associées à chaque échantillon, ladite superposition se faisant en fonction de la distance séparant les minicartes MC associées auxdites images IM

représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts et en tenant compte de la transformation associée à ladite distance, de sorte à obtenir au moins une image IM résultante. On entend par image IM résultante une image obtenue par la superposition d'au moins deux images IM. Il est important de

5 noter que la superposition entre une première image IM et une deuxième image IM se fait à partir d'informations relatives à une première minicarte MC associée à la première image et une deuxième minicarte MC associée à la deuxième image IM, la première et la deuxième minicarte MC étant relatives au même type de défauts ou aux même types de défauts. De plus, lorsque l'on superpose deux images IM, il

10 est nécessaire de prendre en compte le nombre d'images IM superposées pour obtenir lesdites images IM afin d'appliquer les coefficients de pondération adaptée comme cela a déjà été détaillé dans le cas des minicartes MC. Pour cela, comme dans le cas des minicartes, toute image obtenue par la superposition d'autres images est associée à un nombre représentant le nombre d'images IM ayant été

15 nécessaire à son obtention. Autrement dit, l'image \mathbf{IM}_{tot} obtenue par la superposition d'une première image $\mathbf{IM}_{\text{part1}}$ correspondant à la superposition de i images IM et d'une deuxième image $\mathbf{IM}_{\text{part2}}$ correspondant à la superposition de j images IM est donnée par $\mathbf{IM}_{\text{tot}} = \frac{i}{i+j} \mathbf{IM}_{\text{part1}} + \frac{j}{i+j} \mathbf{IM}_{\text{part2}}$ (ici une image est considérée sous sa forme matricielle, chaque pixel de ladite image étant associé à

20 un élément de la matrice). De plus, la minicarte \mathbf{IM}_{tot} sera associée à un nombre d'image IM superposée égal à $i + j$. La notion de distance associée à une transformation confère au procédé selon l'invention des propriétés que n'aurait pas une comparaison directe des images (si cette dernière était techniquement possible). Notamment, en fonction du ou des types de défaut représentés sur les

25 minicartes MC, la superposition des images IM peut varier. Par exemple, deux images IM peuvent chacune correspondre à une première minicarte MC associée à un premier type de défaut et une deuxième minicarte MC associée à un deuxième type de défaut. De plus, la distance entre la première minicarte MC associée à la première image IM et la première minicarte MC associée à la deuxième image IM

30 peut être associée à une transformation identité tandis que la distance entre la deuxième minicarte MC associée à la première image IM et la deuxième minicarte MC associée à la deuxième image IM peut être associée à une rotation

de $\frac{\pi}{2}$ de la deuxième minicarte MC associée à la deuxième image IM. Dans ce cas, si la superposition des deux images IM est effectuée en fonction des premières minicartes MC, ladite superposition se fera sans aucune transformation. En revanche, si la superposition des deux images IM est effectuée en fonction des
5 deuxièmes minicartes MC, ladite superposition se fera après une rotation de $\frac{\pi}{2}$.

Un deuxième aspect de l'invention concerne un procédé de fabrication de cellules photovoltaïques comprenant au moins une étape d'analyse d'au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons EC à partir d'une image IM par photoluminescence ou électroluminescence de chaque
10 échantillon EC caractéristique d'au moins un type de défauts parmi ladite pluralité de types de défauts à l'aide d'un procédé selon un premier aspect de l'invention. Dans un mode de réalisation, les cellules photovoltaïques sont à base de silicium à homojonction ou hétérojonction. Les échantillons EC peuvent être des plaquettes *as-cut* (c'est-à-dire avant d'entrer dans la ligne de production), des plaquettes
15 prélevées en cours de production ou bien encore les plaquettes une fois le procédé de fabrication terminé.

On notera qu'un procédé selon un premier ou un deuxième aspect de l'invention peut être mis en œuvre dans un cadre de recherches, par exemple pour comprendre les défauts physiques réels de l'échantillon EC ou des échantillons EC.
20 Il peut également être mis en œuvre dans un cadre de contrôle de la qualité des échantillons EC, dans la cadre de la production à proprement parlé ou bien encore dans le cadre d'une calibration lors de la mise en route d'un nouveau procédé de fabrication ou d'une nouvelle ligne de fabrication (« *debugging* » en anglais).

Afin de mettre en œuvre les deux procédés qui viennent d'être détaillés, un
25 troisième aspect de l'invention concerne un dispositif comprenant les moyens pour mettre en œuvre un procédé selon un premier aspect ou un deuxième aspect de l'invention. Dans un mode de réalisation, le dispositif comporte un calculateur (par exemple un processeur, un FPGA ou une carte ASIC) associé à une mémoire. La mémoire peut contenir les instructions nécessaires à l'exécution des différentes
30 étapes dudit procédé ainsi que les données nécessaires à ladite exécution,

notamment les images IM ainsi que les minicartes MC obtenues à partir desdites images IM. Dans un mode de réalisation, le dispositif comprend également des moyens pour acquérir des images IM des échantillons à analyser. Dans un mode de réalisation, les moyens d'acquisition comprennent qu'un dispositif d'excitation, par exemple un laser, configuré pour exciter un échantillon de sorte à ce que ce dernier émette des photons par luminescence ainsi qu'un dispositif d'acquisition d'une image IM de luminescence, par exemple une caméra.

REVENDEICATIONS

1. Procédé d'analyse d'au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons (EC) à partir d'une image (IM) de chaque échantillon (EC) caractéristique d'au moins un type de défauts parmi ladite pluralité de types de défauts comprenant :
- 5
- pour chaque échantillon (EC), une étape (E1) de création d'au moins une matrice appelée minicarte (MC) comprenant une pluralité de cases et représentative d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts dont la résolution est inférieure à l'image (IM) de l'échantillon (EC), chaque case de la minicarte (MC) étant associée à une pluralité de pixels de l'image (IM) de l'échantillon (EC) et ayant un score fonction desdits pixels et représentatif de la quantité d'au moins un type de défauts ;
 - 10
 - une étape (E2) de détermination de la distance entre chaque minicarte (MC) représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts, la distance entre deux minicartes (MC) étant définie comme la distance minimale entre deux minicartes (MC) en considérant les transformations suivantes : une rotation et/ou une symétrie de sorte que chaque distance entre deux minicartes (MC) est associée à une transformation ;
 - 15
 - 20
- l'analyse d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts entre au moins deux échantillons (EC) étant effectuée en tenant compte de la transformation associée à la distance entre chaque minicarte (MC) représentative d'au moins un type de défauts parmi la pluralité de types de défauts.
- 25
2. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'étape (E1) de création d'une minicarte comprend :
- une première sous-étape (E11) de création d'une grille (GR), la grille (GR) ayant une résolution de $N \times N$ carreaux où $N \times N$ est la résolution de la minicarte (MC) à déterminer, le centre de la grille (GR)
 - 30

- étant aligné sur le centre de l'image (IM) et la grille (GR) recouvrant entièrement ladite image (IM) ;
- une sous-étape (E12) de calcul pour chaque carreau de la grille (GR) d'un score fonction des pixels de l'image (IM) recouverts par ledit carreau, le score de chaque carreau de la grille (GR) étant attribuée à la case de la minicarte (MC) correspondante.
- 5
3. Procédé selon la revendication 1 caractérisé en ce que l'étape (E1) de création d'une minicarte comprend :
- une première sous-étape (E11') de création d'une première grille (GR1) intermédiaire, la première grille (GR1) intermédiaire ayant une résolution de $N \times N$ carreaux où $N \times N$ est la résolution de la minicarte (MC), le centre de la première grille (GR1) intermédiaire étant aligné sur le centre de l'image (IM) et la première grille (GR1) intermédiaire recouvrant entièrement ladite image (IM) ;
- 10
- une deuxième sous-étape (E12') de création d'une deuxième grille (GR2) intermédiaire, la deuxième grille (GR2) intermédiaire ayant une résolution de $(N - 1) \times (N - 1)$ carreaux, les dimensions des carreaux de la deuxième grille (GR2) intermédiaire étant égale aux dimensions des carreaux de la première grille (GR1) intermédiaire, le centre de la deuxième grille (GR2) étant aligné sur le centre de l'image (IM) ;
- 15
- une troisième sous-étape (E13') de calcul pour chaque carreau de la première grille (GR1) intermédiaire et de la deuxième grille (GR2) intermédiaire d'un score fonction des pixels de l'image (IM) recouverts par lesdits carreaux ;
- 20
- une quatrième sous-étape (E14') de calcul du score de chaque case de la minicarte (MC), le score d'une case étant égal à la somme pondérée du score du carreau de la première grille (GR1) intermédiaire associé à ladite case et de la ou des carreaux de la deuxième grille (GR2) intermédiaire recouvrant le carreau de la première grille (GR1) intermédiaire considéré.
- 25
- 30
4. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il

comprend une étape de détermination d'une quantité de défaut maximum, ladite quantité étant associée à une valeur du score, dite valeur haute de référence.

- 5 5. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend, avant l'étape (E1) de création d'au moins une minicarte (MC), pour chaque échantillon (EC), une étape (E0) d'application d'un masque (MS) sur l'image (IM) de l'échantillon (EC), l'étape (E1) de création d'au moins une minicarte (MC) étant réalisée en tenant compte de la présence du masque (MS).
- 10 6. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend, lorsque l'image (IM) de chaque échantillon (EC) est caractéristique d'une pluralité de types de défauts et avant l'étape de (E1) de création d'au moins une minicarte (MC), une étape (E0') de filtrage de l'image (IM) de l'échantillon.
- 15 7. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend une étape de superposition des minicartes (MC) représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts, ladite superposition se faisant en fonction de la distance séparant lesdites minicartes (MC), et en tenant compte de la transformation associée à ladite distance, de sorte à obtenir au moins une minicarte (MC) résultante.
- 20 8. Procédé selon l'une des revendications précédentes caractérisé en ce qu'il comprend une étape de superposition des images (IM), ladite superposition se faisant en fonction de la distance séparant les minicartes (MC) représentant le ou les mêmes types de défauts parmi la pluralité de types de défauts et associée à chaque image (IM), et en tenant compte de la transformation associée à ladite distance, de sorte à obtenir au moins une image (IM) résultante.
- 25 9. Procédé de fabrication de cellules photovoltaïques comprenant au moins une étape d'analyse d'au moins deux échantillons (EC) à partir d'une image (IM)

par photoluminescence ou électroluminescence de chaque échantillon (EC) comportant au moins un type de défauts parmi une pluralité de types de défauts à l'aide d'un procédé selon l'une des revendications précédentes.

- 5 10. Dispositif comprenant les moyens pour mettre en œuvre un procédé selon l'une des revendications précédentes.
11. Programme d'ordinateur comprenant des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par un ordinateur, conduisent celui-ci à mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 9.
- 10 12. Support de données lisible par ordinateur, sur lequel est enregistré le programme d'ordinateur selon la revendication 11.

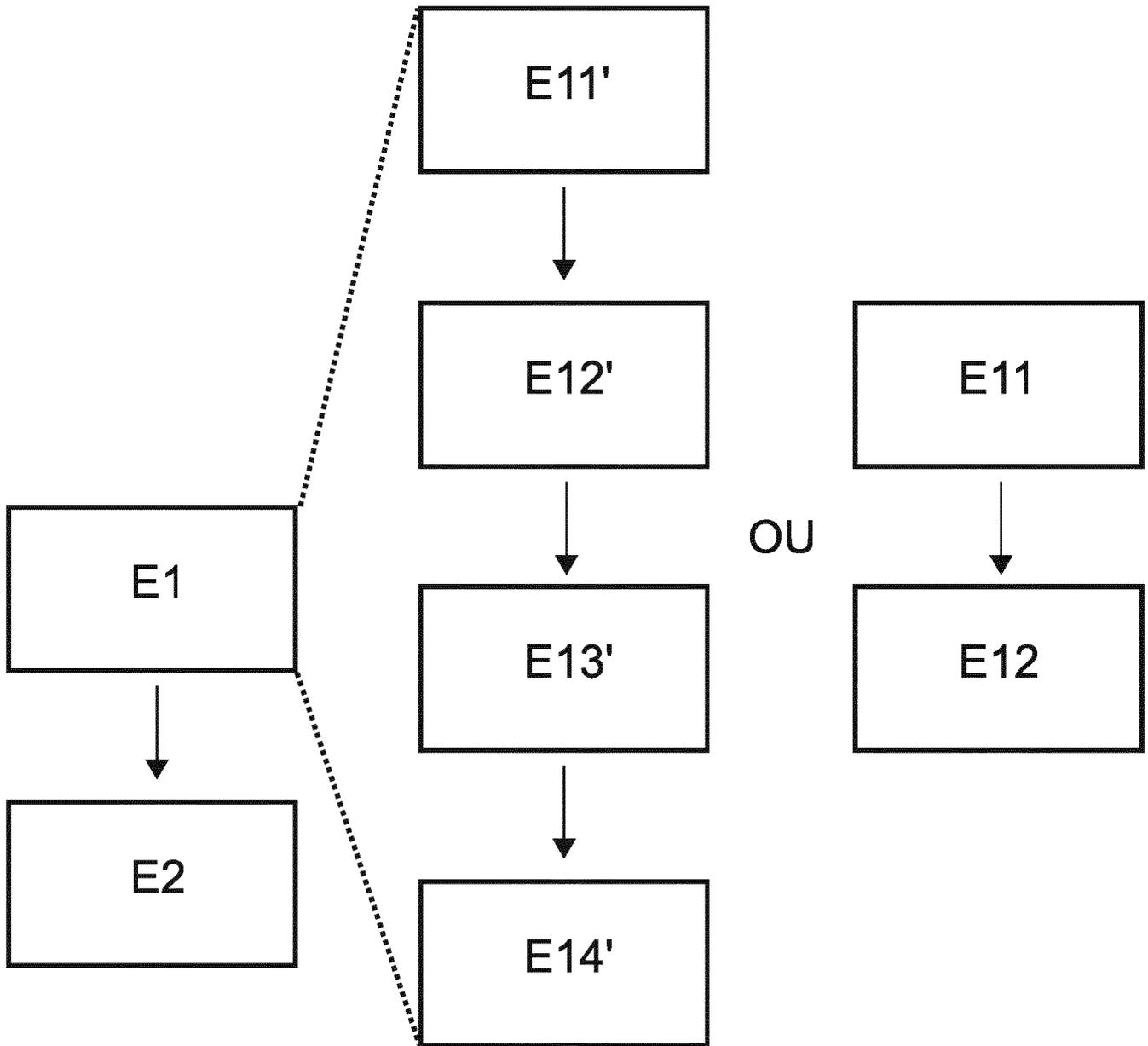


FIG. 1

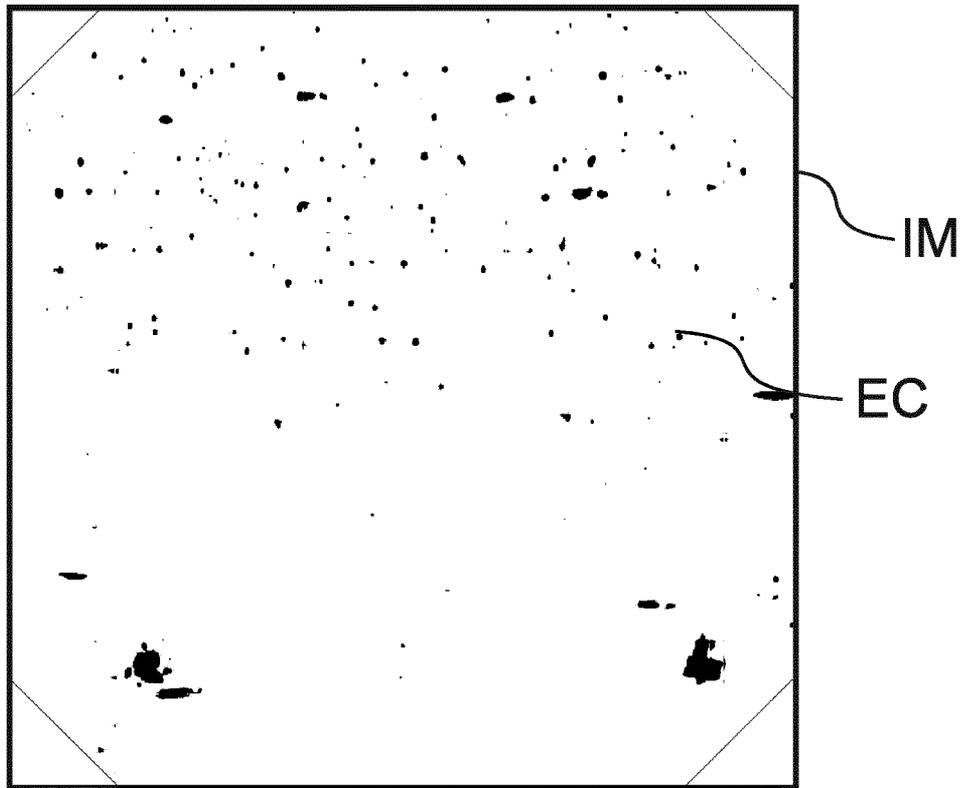


FIG. 2A

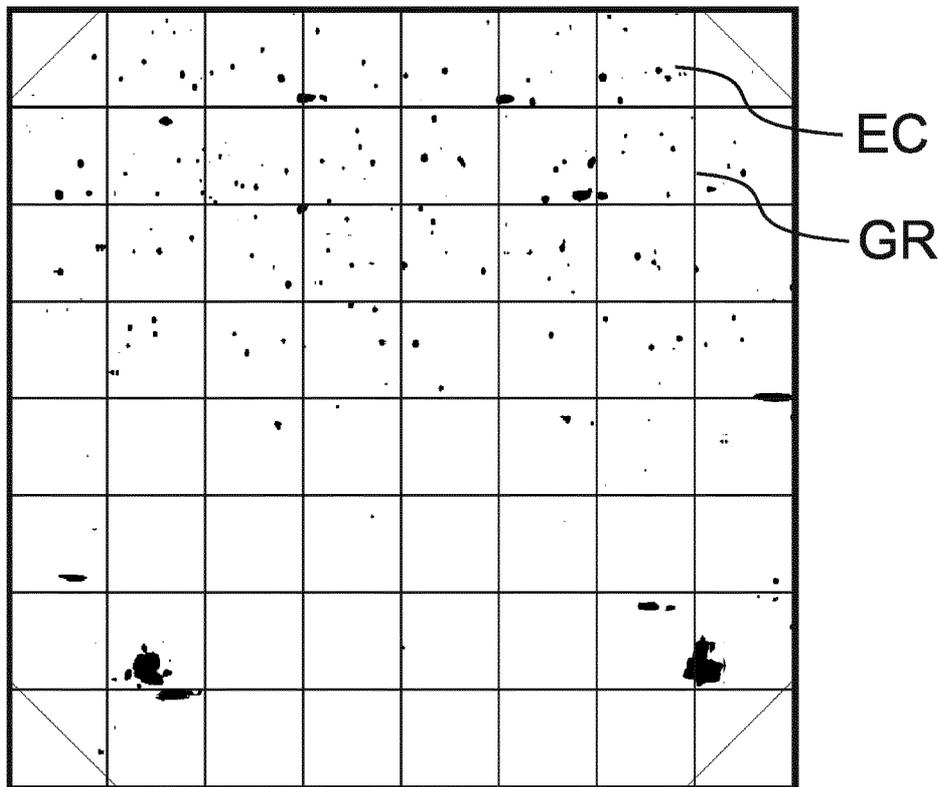


FIG. 2B

6	5	5	6	4	10	10	1
10	8	6	7	8	15	10	10
8	7	8	6	6	6	6	2
2	8	9	8	4	4	6	13
1	0	3	2	0	2	10	10
10	0	0	1	0	0	0	2
0	100	0	0	1	0	30	70
1	1	0	0	0	0	0	0

GR

EC

FIG. 2C

6	5	5	6	4	10	10	1
10	8	6	7	8	15	10	10
8	7	8	6	6	6	6	2
2	8	9	8	4	4	6	13
1	0	3	2	0	2	10	10
10	0	0	1	0	0	0	2
0	100	0	0	1	0	30	70
1	1	0	0	0	0	0	0

MC

FIG. 2D

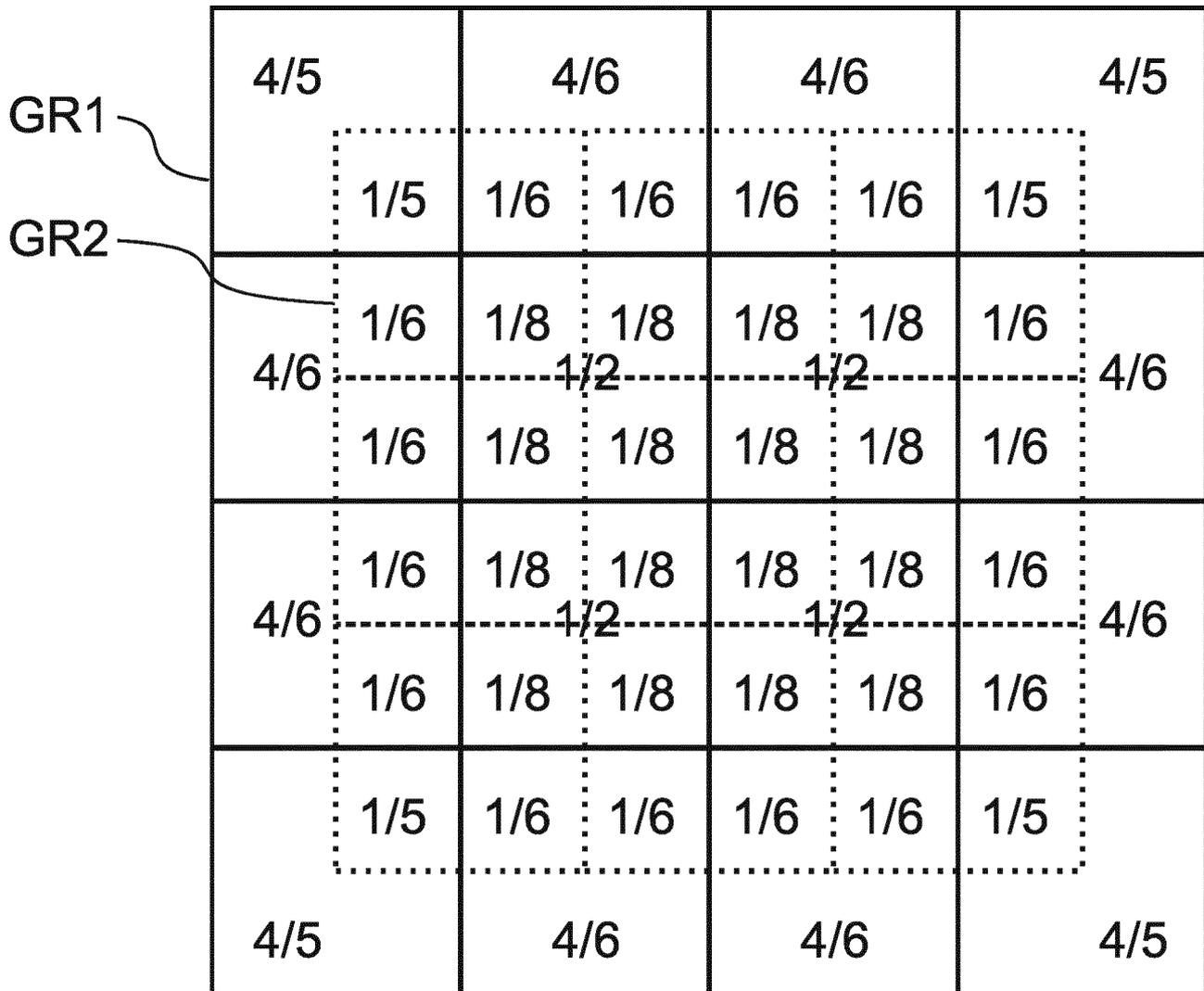


FIG. 3

FIG. 4A

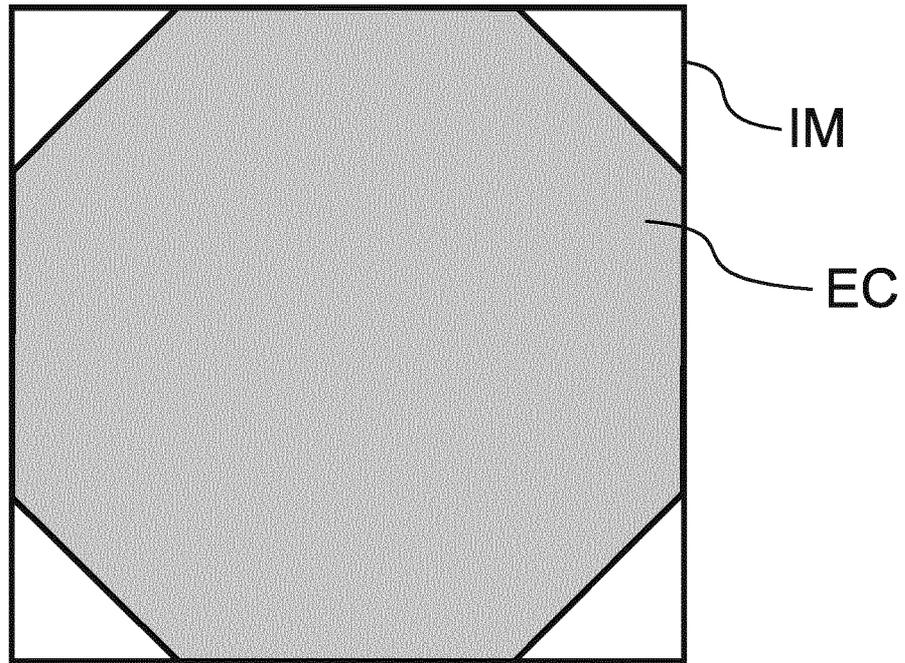
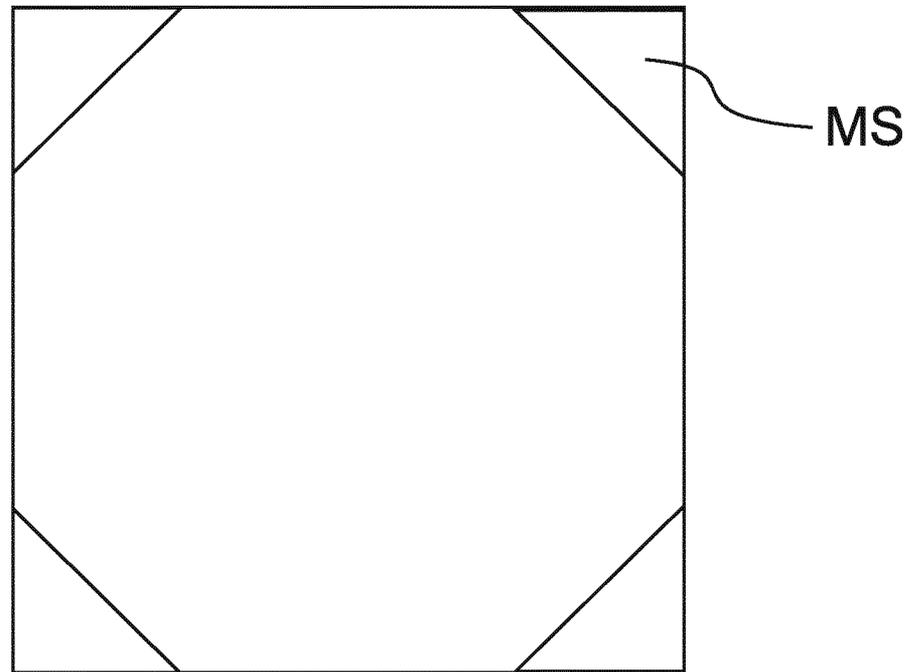


FIG. 4B



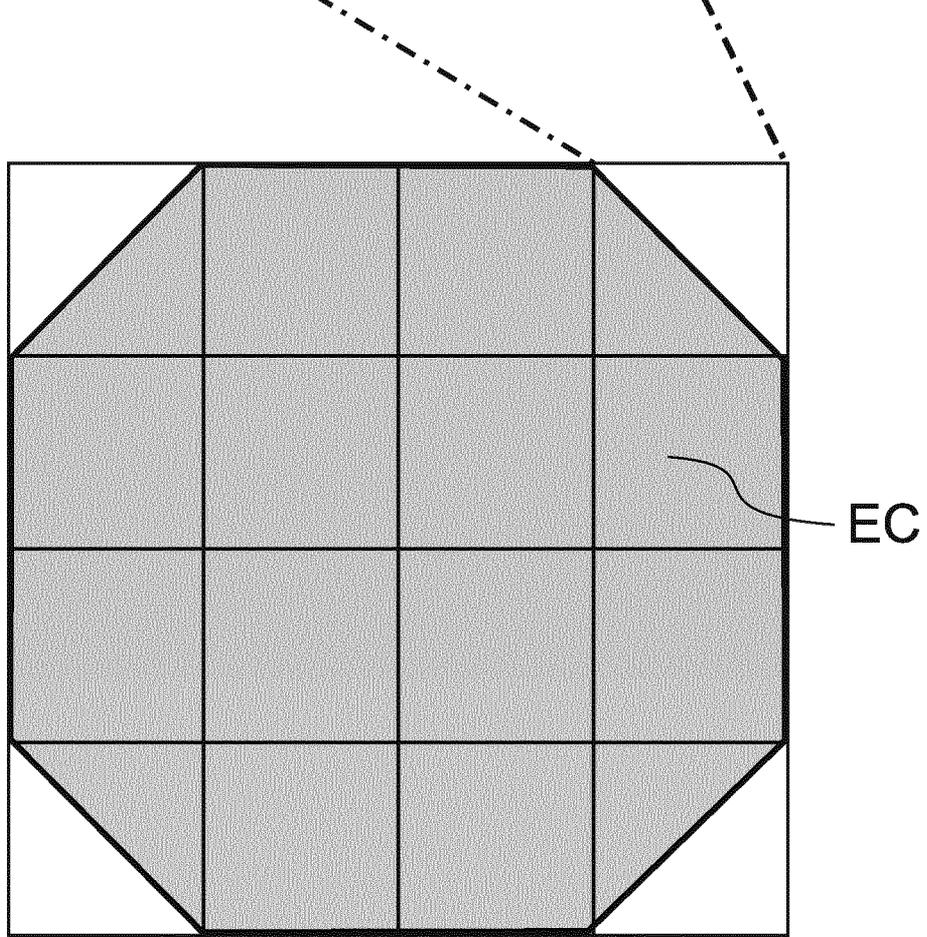
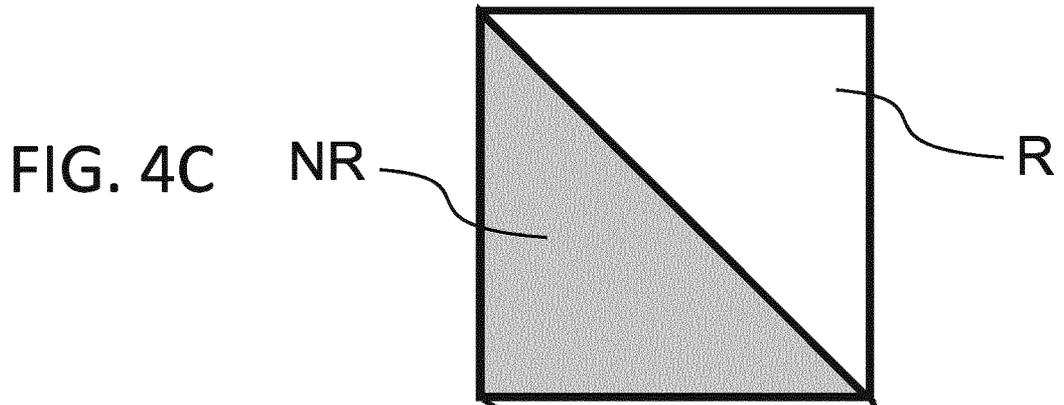


FIG. 4D

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/070522

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>G06T 7/00</i> (2017.01)i; <i>G06T 7/33</i> (2017.01)i; <i>G01N 21/64</i> (2006.01)i; <i>G01N 21/95</i> (2006.01)i; <i>H01L 21/66</i> (2006.01)n; <i>G01N 21/956</i> (2006.01)n		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G06T; G01N; H01L; G06K		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	NOS O ET AL. "Quality control method based on photoluminescence imaging for the performance prediction of c-Si/a-Si:H heterojunction solar cells in industrial production lines" <i>SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS</i> , Vol. 144, 2016, pages 210-220 DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2015.09.009 ISSN: 0927-0248, XP029304977 abstract; figure 2 page 211 - page 212	1-12
A	US 2016322934 A1 (NOS AGUILA ORIOL [FR] ET AL) 03 November 2016 (2016-11-03) abstract; figures 1-8 paragraph [0155] - paragraph [0177]	1-12
A	US 2016313256 A1 (SULLIVAN JAMIE M [US] ET AL) 27 October 2016 (2016-10-27) abstract; figures 8A, 9 [0027-0028], [0049-0067];claim 1	1-12
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 20 August 2019		Date of mailing of the international search report 05 September 2019
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Borotschnig, Hermann Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2019/070522

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LISA GOTTESFELD BROWN. "A survey of image registration techniques" <i>ACM COMPUTING SURVEYS, ACM, NEW YORK, NY, US, US,</i> Vol. 24, No. 4, December 1992 (1992-12), pages 325-376 DOI: 10.1145/146370.146374 ISSN: 0360-0300, XP058191421 abstract; figure 3 page 329 - page 340	1-12
<hr/>		

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/EP2019/070522

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2016322934	A1	03 November 2016	CN	105960587	A	21 September 2016
				CN	109781693	A	21 May 2019
				EP	3084402	A2	26 October 2016
				EP	3511701	A1	17 July 2019
				FR	3015770	A1	26 June 2015
				KR	20160101135	A	24 August 2016
				US	2016322934	A1	03 November 2016
				US	2019158020	A1	23 May 2019
				WO	2015091895	A2	25 June 2015
<hr/>							
US	2016313256	A1	27 October 2016	CN	107466366	A	12 December 2017
				EP	3286780	A1	28 February 2018
				JP	6550470	B2	24 July 2019
				JP	2018516367	A	21 June 2018
				KR	20170137181	A	12 December 2017
				TW	201704736	A	01 February 2017
				US	2016313256	A1	27 October 2016
				WO	2016172184	A1	27 October 2016
<hr/>							

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Demande internationale n°

PCT/EP2019/070522

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE INV. G06T7/00 G06T7/33 G01N21/64 G01N21/95 ADD. H01L21/66 G01N21/956		
Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB		
B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement) G06T G01N H01L G06K		
Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche		
Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	NOS 0 ET AL: "Quality control method based on photoluminescence imaging for the performance prediction of c-Si/a-Si:H heterojunction solar cells in industrial production lines", SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS, vol. 144, 2016, pages 210-220, XP029304977, ISSN: 0927-0248, DOI: 10.1016/J.SOLMAT.2015.09.009 abrégé; figure 2 page 211 - page 212	1-12
A	US 2016/322934 A1 (NOS AGUILA ORIOL [FR] ET AL) 3 novembre 2016 (2016-11-03) abrégé; figures 1-8 alinéa [0155] - alinéa [0177]	1-12
	----- -/--	
<input checked="" type="checkbox"/> Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents		<input checked="" type="checkbox"/> Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe
* Catégories spéciales de documents cités:		
"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent "E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date "L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée) "O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens "P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée	"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention "X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément "Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier "&" document qui fait partie de la même famille de brevets	
Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée 20 août 2019	Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale 05/09/2019	
Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Fonctionnaire autorisé Borotschnig, Hermann	

C(suite). DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie*	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	<p>US 2016/313256 A1 (SULLIVAN JAMIE M [US] ET AL) 27 octobre 2016 (2016-10-27) abrégé; figures 8A, 9 [0027-0028], [0049-0067]; revendication 1</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-12
A	<p>LISA GOTTESFELD BROWN: "A survey of image registration techniques", ACM COMPUTING SURVEYS, ACM, NEW YORK, NY, US, US, vol. 24, no. 4, décembre 1992 (1992-12), pages 325-376, XP058191421, ISSN: 0360-0300, DOI: 10.1145/146370.146374 abrégé; figure 3 page 329 - page 340</p> <p style="text-align: center;">-----</p>	1-12

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Demande internationale n°

PCT/EP2019/070522

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
US 2016322934 A1	03-11-2016	CN 105960587 A	21-09-2016
		CN 109781693 A	21-05-2019
		EP 3084402 A2	26-10-2016
		EP 3511701 A1	17-07-2019
		FR 3015770 A1	26-06-2015
		KR 20160101135 A	24-08-2016
		US 2016322934 A1	03-11-2016
		US 2019158020 A1	23-05-2019
		WO 2015091895 A2	25-06-2015

US 2016313256 A1	27-10-2016	CN 107466366 A	12-12-2017
		EP 3286780 A1	28-02-2018
		JP 6550470 B2	24-07-2019
		JP 2018516367 A	21-06-2018
		KR 20170137181 A	12-12-2017
		TW 201704736 A	01-02-2017
		US 2016313256 A1	27-10-2016
		WO 2016172184 A1	27-10-2016
