

Description

Titre de l'invention : Procédé et système de test pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples

- [0001] L'invention se rapporte à un procédé pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples. L'invention se rapporte en outre à un système de test pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples ainsi qu'à un programme informatique pour la mise en œuvre du procédé.
- [0002] Les unités de projection micro-optiques et les unités de projection optiques sub-longueur d'onde comprennent généralement plusieurs éléments micro-optiques et/ou plusieurs éléments optiques sub-longueur d'onde, respectivement. En règle générale, les unités de projection comprennent plusieurs centaines ou plusieurs milliers de ces éléments optiques, le diamètre des éléments optiques individuels étant généralement inférieur à 1 mm (unité de projection micro-optique), en particulier inférieur à 1 μm (unité de projection optique sub-longueur d'onde), et pouvant être de l'ordre de plusieurs nanomètres.
- [0003] Comparées aux optiques classiques, les techniques de fabrication d'équipement micro-optique et/ou d'équipement optique sub-longueur d'onde peuvent être très différentes, étant donné que la densité d'assemblage requise d'éléments optiquement actifs est considérablement plus élevée.
- [0004] Des écarts dans un ou plusieurs paramètres du processus de production peuvent survenir lors de la production des unités de projection. La taille, la courbure et/ou la position des éléments optiques par exemple peuvent varier en raison des tolérances et des variations du processus. En particulier la distance entre les éléments optiques individuels peut varier.
- [0005] Des trous d'épingle qui entraînent la transmission de lumière à travers l'unité de projection dans des zones situées en dehors des éléments optiques peuvent en outre être présents dans le wafer.
- [0006] En général, l'exigence quant à la précision de positionnement des éléments optiques individuels des unités de projection et aussi concernant d'autres défauts tels que les trous d'épingle mentionnés ci-dessus est très élevée.
- [0007] Toutefois, selon l'application de l'unité de projection, les défauts peuvent être tolérables jusqu'à un certain degré. La qualité des unités de projection doit donc être évaluée afin de garantir que les critères de qualité respectifs sont respectés par l'unité

de projection.

- [0008] Ainsi, l'objet de l'invention est de fournir un procédé ainsi qu'un système pour l'évaluation de la qualité d'unités de projection micro-optiques et/ou de projection optique sub-longueur d'onde.
- [0009] Selon l'invention, le problème est résolu par un procédé pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples. Le procédé comprend les étapes suivantes : au moins une partie prédéfinie de l'unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde est illuminée de telle sorte qu'une image est générée par au moins deux canaux de la partie prédéfinie de l'unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples. L'image est saisie et analysée. Au moins une grandeur caractéristique est déterminée sur la base de l'analyse de l'image, une valeur de la grandeur caractéristique étant associée à au moins une particularité caractéristique de l'unité de projection, à au moins un défaut de l'unité de projection et/ou à au moins une classe de défauts de l'unité de projection. La qualité de l'unité de projection est évaluée sur la base de ladite au moins une grandeur caractéristique.
- [0010] Les éléments optiques sub-longueur d'onde, en particulier les lentilles sub-longueur d'onde, peuvent également être appelés éléments nano-optiques, en particulier nano-lentilles.
- [0011] L'invention est basée sur la constatation que des défauts de l'unité de projection sont directement liés à certains défauts dans l'image générée par l'unité de projection. Par exemple des écarts dans les positions de zones optiquement actives de l'unité de projection et des écarts par rapport à une courbure souhaitée de zones optiquement actives individuelles, et/ou des trous d'épingle dans le wafer conduisent tous à des défauts caractéristiques respectivement associés dans l'image.
- [0012] En outre, des trous d'épingle indésirables dans l'unité de projection provoquent des spots circulaires clairs dans l'image ; des désalignements involontaires au cours du processus de fabrication entraînent des contours flous ; des défauts mécaniques sur des lentilles (par exemple des rayures et/ou des fissures) entraînent des anneaux noirs circulaires et/ou des spots sombres ; des contaminations indésirables dans le processus de fabrication entraînent des taches sombres (spots sombres), par exemple des irrégularités dans le motif.
- [0013] En analysant les défauts dans l'image générée par l'unité de projection, il est possible d'évaluer la qualité de l'unité de projection de manière particulièrement rapide et pratique en employant des techniques de traitement d'image à l'image saisie. De nombreuses techniques de traitement d'image différentes bien élaborées sont connues de l'état de la technique.

- [0014] L'image qui est générée au moins par la partie prédéfinie de l'unité de projection, qui est saisie et ensuite analysée peut être la même image que celle que l'unité de projection va générer pendant son utilisation prévue, ou des parties de celle-ci.
- [0015] En alternative ou en supplément, l'image à saisir et à analyser peut être générée en illuminant au moins la partie prédéfinie de la même manière que lors de l'utilisation prévue de l'unité de projection.
- [0016] L'unité de projection est, par exemple, réalisée de manière à créer une projection d'un motif sur une surface, en particulier une surface dans un agencement prédéfini par rapport à l'unité de projection.
- [0017] Selon un aspect de l'invention, ladite au moins une grandeur caractéristique comprend au moins l'une des grandeurs suivantes : netteté, niveau d'obscurité, uniformité, fluctuations de la luminosité et/ou défauts locaux. Il s'est avéré que ces grandeurs sont particulièrement appropriées pour évaluer la qualité de l'unité de projection, étant donné qu'elles sont directement associées à des défauts spécifiques qui peuvent typiquement survenir lors de la fabrication de l'unité de projection.
- [0018] Selon un autre aspect de l'invention, l'unité de projection micro-optique est classée dans l'une d'au moins deux classes de qualité sur la base de ladite au moins une grandeur caractéristique. Ainsi, l'unité de projection peut être classée dans l'une de deux classes exactement, par exemple "test de qualité réussi" ou "test de qualité non réussi". En alternative, l'unité de projection peut être classée dans l'une parmi plusieurs classes, telles que "niveau de qualité A", "niveau de qualité B", etc. Chacune des classes est associée à certaines exigences de qualité qui doivent être respectées, notamment certains seuils pour une ou plusieurs des grandeurs caractéristiques qui doivent être respectées.
- [0019] Dans un autre mode de réalisation de l'invention, l'unité de projection comprend plusieurs éléments micro-optiques et/ou plusieurs éléments optiques sub-longueur d'onde, en particulier des micro-lentilles et/ou des lentilles sub-longueur d'onde, les éléments optiques présentant en particulier une taille, une courbure, un masquage et/ou une position dans l'unité de projection, la taille, la courbure et/ou la position étant au moins l'une desdites au moins une particularités caractéristiques de l'unité de projection. Des écarts dans les positions des éléments optiques et/ou des écarts par rapport à une courbure souhaitée des éléments optiques individuels sont associés à des défauts spécifiques dans l'image saisie. Par conséquent, des défauts dans l'image saisie peuvent être liés à des défauts de l'unité de projection et/ou des éléments optiques, de sorte que les défauts dans l'image saisie peuvent être utilisés pour évaluer la qualité de l'unité de projection.
- [0020] En général, chacun des éléments optiques est réalisé de manière à diffracter, réfracter et/ou guider la lumière d'une manière prédéterminée. Ainsi, des éléments optiques

présentant des propriétés de diffraction, de réfraction et/ou de guidage peuvent être mis en œuvre sur la même unité de projection, en particulier sur un substrat commun.

- [0021] Au moins certains des éléments optiques, en particulier tous les éléments optiques, peuvent être réalisés de manière identique les uns aux autres. De même, au moins certains des éléments optiques, en particulier tous les éléments optiques, peuvent être réalisés différemment les uns des autres, c'est-à-dire que les éléments optiques peuvent être différents, par exemple, quant à la taille et/ou la courbure.
- [0022] L'unité de projection peut comprendre au moins une particularité mécanique supplémentaire, par exemple une entretoise et/ou au moins une saillie. L'entretoise et/ou ladite au moins une saillie peut/peuvent servir à définir une distance entre l'unité de projection et un autre composant respectif pendant l'utilisation de l'unité de projection.
- [0023] Une particularité géométrique de l'entretoise et/ou de ladite au moins une saillie peut en particulier être une grandeur caractéristique de l'unité de projection. Par exemple une hauteur, largeur et/ou profondeur de l'entretoise et/ou de ladite au moins une saillie peut/peuvent être une grandeur caractéristique de l'unité de projection.
- [0024] Les éléments optiques forment en particulier un groupement, le groupement présentant une distance entre deux éléments optiques voisins qui est au moins l'une desdites au moins une particularités caractéristiques de l'unité de projection. La distance peut être la distance minimale entre les éléments optiques voisins individuels, la distance maximale entre les éléments optiques voisins individuels et/ou la distance moyenne entre les éléments optiques voisins individuels.
- [0025] Dans un autre mode de réalisation de l'invention, la qualité de l'unité de projection est évaluée pendant la fabrication de l'unité de projection, en particulier en fin de ligne. L'évaluation de la qualité est de préférence répétée après plusieurs étapes intermédiaires de la fabrication de l'unité de projection. Sur la base de l'évaluation de la qualité au cours de la fabrication, l'unité de projection, si nécessaire, peut être rejetée dans une phase plus précoce de la fabrication, ce qui permet d'économiser du temps de production et des ressources de production.
- [0026] Selon un autre aspect de l'invention, les paramètres de fabrication, en particulier au moins l'une des particularités caractéristiques, sont adaptés sur la base de l'évaluation de la qualité de l'unité de projection. Ainsi, les paramètres du processus peuvent être adaptés de manière à améliorer la qualité de l'unité de projection. En d'autres termes, d'éventuelles erreurs et/ou d'éventuels écarts peuvent être pris en compte pendant la production, grâce à quoi l'effet de ces écarts de production sont atténués.
- [0027] Les paramètres de fabrication pouvant être adaptés sont, par exemple, l'épaisseur de la couche de base de l'unité de projection, la forme de la lentille et/ou la courbure de la lentille.
- [0028] L'image de l'unité de projection est de préférence analysée au moyen d'un procédé

statistique et/ou d'un module d'apprentissage automatique, le module d'apprentissage automatique comprenant en particulier un réseau de neurones artificiel pré-entraîné. En d'autres termes, l'image peut être analysée par un procédé purement classique et déterministe qui repose sur des algorithmes classiques, c'est-à-dire des règles de calcul. D'autre part, l'image peut être analysée uniquement par un procédé d'apprentissage automatique ou par une combinaison des deux.

- [0029] Le module d'apprentissage automatique peut être pré-entraîné avec des données d'entraînement étiquetées, les données d'entraînement étiquetées comprenant des images échantillons générées par la partie prédéfinie d'une unité de projection optique échantillon, et les données d'entraînement étiquetées comprenant ladite au moins une grandeur caractéristique correspondant aux images échantillons respectives et/ou à la classe de qualité de l'unité de projection échantillon respective. Ainsi, le module d'apprentissage automatique est pré-entraîné de manière supervisée.
- [0030] Le module d'apprentissage automatique comprend de préférence un réseau de neurones artificiel, par exemple un réseau de neurones convolutif (CNN) et/ou un réseau de neurones récurrent (RNN) qui est pré-entraîné pour analyser l'image, déterminer ladite au moins une grandeur caractéristique et/ou évaluer la qualité de l'unité de projection.
- [0031] En alternative, le module d'apprentissage automatique peut être pré-entraîné de manière semi-supervisée avec des données partiellement étiquetées ou de manière non supervisée.
- [0032] Selon un autre aspect de l'invention, ladite au moins une grandeur caractéristique correspondant aux images échantillons respectives est obtenue en appliquant le procédé statistique aux images échantillons. Ainsi, l'image échantillon est d'abord analysée par l'approche statistique classique, le résultat de l'analyse statistique produisant l'étiquette pour l'image respective.
- [0033] En d'autres termes, l'approche statistique est effectuée pour un ensemble limité d'images échantillons. Les images échantillons et le résultat de l'analyse statistique constituent les données d'entraînement pour le module d'apprentissage automatique. Ainsi, le procédé statistique ne peut être appliqué à cet ensemble d'entraînement limité uniquement pour entraîner le module d'apprentissage automatique, tandis que l'évaluation de la qualité pendant la fabrication de l'unité de projection est effectuée par le module d'apprentissage automatique.
- [0034] Selon l'invention, le problème est en outre résolu par un système de test pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples, comprenant une unité d'illumination, un dispositif de saisie d'image, un module d'analyse d'image et un module de commande, le module de commande étant réalisé de manière à amener le système de

test à exécuter le procédé décrit ci-dessus. En ce qui concerne les avantages et les caractéristiques du système de test, il est fait référence aux explications données ci-dessus concernant le procédé, lesquelles sont également valables pour le système de test et vice versa.

- [0035] Selon un aspect de l'invention, le système de test comprend un dispositif sous test, le dispositif sous test étant en particulier une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples. D'une manière générale, le dispositif sous test est un substrat, telle qu'un wafer comprenant une ou plusieurs unités de projection micro-optiques et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples. Le dispositif sous test peut en particulier être réalisé sous forme d'unité de projection unique.
- [0036] Selon l'invention, le problème est en outre résolu par un programme informatique comprenant des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par une unité de traitement du module de commande du système de test décrit ci-dessus, amènent le système de test à exécuter les étapes du procédé décrit ci-dessus. En ce qui concerne les avantages et les particularités du programme informatique, il est fait référence aux explications données ci-dessus concernant le procédé, lesquelles sont également valables pour le programme informatique et vice versa.
- [0037] Le terme "instructions" désigne ici et dans ce qui suit des instructions sous forme de code de programme et/ou de modules de code de programme sous forme compilée et/ou non compilée, les instructions pouvant être établies dans n'importe quel langage de programmation et/ou en langage machine.
- [0038] Les aspects ci-dessus et grand nombre des avantages de l'objet revendiqué qui en découlent ressortiront plus clairement à mesure qu'ils seront mieux compris en se référant à la description détaillée suivante, lorsque celle-ci sera prise en considération avec les dessins qui l'accompagnent, dans lesquels :
- [0039] [fig.1] montre schématiquement un système de test selon l'invention ;
- [0040] [fig.2] montre une vue détaillée d'une image générée par une unité de projection selon l'invention ;
- [0041] [fig.3] montre un organigramme schématique d'un procédé pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples selon l'invention ;
- [0042] [Fig 4 à 6] montrent respectivement des illustrations de différentes étapes du procédé de la [fig.3].
- [0043] La [fig.1] montre schématiquement un système de test 10 comprenant une unité d'illumination 12, un dispositif sous test 14, un écran 16 et un dispositif de saisie d'image 18.
- [0044] Le système de test 10 comprend en outre une unité de commande et d'analyse 20

présentant un module de commande 22 et un module d'analyse d'image 24, l'unité de commande et d'analyse 20 étant reliée à l'unité d'illumination 12 et au dispositif de saisie d'image 18 de manière à transmettre un signal.

- [0045] Le dispositif sous test 14 est un substrat 26 comprenant plusieurs unités de projection micro-optiques et/ou de projection optiques sub-longueur d'onde à canaux multiples 28. Dans le cas illustré à la [fig.1], le substrat 26 comprend quatre unités de projection 28. Ce nombre n'est cependant donné qu'à titre illustratif. Le substrat 26 peut également comprendre tout autre nombre d'unités de projection 28.
- [0046] Le dispositif sous test 14 peut en particulier être réalisé sous forme d'une seule unité de projection 28.
- [0047] Les unités de projection 28 comprennent chacune plusieurs éléments micro-optiques et/ou plusieurs éléments optiques sub-longueur d'onde 30. Les unités de projection 28 peuvent comprendre chacune entre dix et 1000 éléments optiques 30, en particulier entre 30 et 500 éléments optiques 30, par exemple entre 50 et 300 éléments optiques 30.
- [0048] Un diamètre des éléments optiques individuels 30 peut être inférieur à 1 mm dans les unités de projection micro-optiques 28, ou inférieur à 1 μ m dans des unités de projection optiques sub-longueur d'onde 28, et peut être de l'ordre de plusieurs nanomètres.
- [0049] Une zone entre les éléments optiques 30 est opaque, de sorte que la lumière ne peut passer à travers les unités de projection qu'à travers les éléments optiques 30.
- [0050] De manière générale, chacun des éléments optiques 30 est réalisé de manière à réfracter, diffracter et/ou guider de la lumière d'une manière prédéfinie. En d'autres termes, chacun des éléments optiques 30 fournit un canal de l'unité de projection à canaux multiples 28.
- [0051] Les éléments optiques 30 ont plus précisément chacun une taille prédéfinie, une courbure prédéfinie et/ou sont dotés d'un masquage de sorte que les propriétés optiques souhaitées des éléments optiques individuels 30 sont obtenues.
- [0052] Les éléments optiques 30 peuvent présenter un masquage réalisé de manière à créer une projection d'un motif sur une surface. L'emplacement de la surface par rapport à l'unité de projection 28 est connu. L'unité de projection 28 est par exemple montée dans une portière de voiture, et les éléments optiques 30 présentent un masquage de sorte qu'une projection d'un emblème du constructeur automobile est produit sur la surface de la route à côté de la voiture, lorsque l'unité de projection 28 est illuminée.
- [0053] Dans ce cas, au moins certains des éléments optiques 30, en particulier tous les éléments optiques 30, peuvent être réalisés de manière identique les uns par rapport aux autres. De même, au moins certains des éléments optiques 30, en particulier tous les éléments optiques 30, peuvent être réalisés différemment les uns des autres,

c'est-à-dire qu'ils peuvent être différents quant à la taille, la courbure et/ou l'étiquetage, par exemple.

- [0054] Les éléments optiques 30 sont agencés de manière prédéterminée dans l'unité de projection respective 28 en fonction du domaine d'application particulier de l'unité de projection 28.
- [0055] Les éléments optiques 30 sont plus précisément agencés de telle sorte qu'une image souhaitée 32 est obtenue derrière l'unité de projection 28 lorsque l'unité de projection 28 est illuminée.
- [0056] Les éléments optiques 30 sont répartis selon un motif prédéfini sur l'aire de l'unité de projection 28. Ceci est illustré dans la [fig.1], où l'image 32 générée par l'illumination de l'une des unités de projection 28 est saisie sur l'écran 16.
- [0057] En d'autres termes, les éléments optiques 30 forment un groupement micro-optique et/ou un groupement optique sub-longueur d'onde à canaux multiples qui est réalisé de manière à générer une image 32 avec des propriétés prédéfinies lorsqu'il est illuminé. Les images générées par les éléments optiques individuels 30 - qui peuvent également être appelés "petits faisceaux" - sont ici superposées, ce qui entraîne un mélange statistique des images générées par les éléments optiques individuels 30.
- [0058] Les éléments optiques 30 peuvent en alternative être répartis de manière aléatoire sur l'aire de l'unité de projection correspondante 28.
- [0059] La [fig.2] montre l'image générée 32 de façon plus détaillée. L'image 32 comprend des zones sombres 34 et des zones illuminées 36. Dans l'exemple spécifique de la [fig.2], les zones illuminées 36 sont des bandes qui comprennent chacune deux tronçons droits reliés entre eux par un tronçon courbe.
- [0060] Lors de la production des unités de projection 28, des écarts peuvent survenir dans un ou plusieurs paramètres du processus. La taille, la courbure et/ou la position des éléments optiques 30 peuvent par exemple varier en raison des tolérances et des variations du processus. En particulier la distance entre les éléments optiques individuels 30 peut varier.
- [0061] Il peut en outre y avoir des défauts tels que des trous d'épingle dans le wafer 26, ce qui entraîne la transmission de lumière à travers l'unité de projection 28 dans des zones situées en dehors des éléments optiques 30.
- [0062] Selon l'application de l'unité de projection 28, de tels défauts peuvent être tolérables jusqu'à un certain degré. Ainsi, la qualité des unités de projection 28 doit être évaluée afin de garantir que les critères de qualité respectifs sont respectés par l'unité de projection 28.
- [0063] Le système de test 10 est réalisé de manière à exécuter un procédé pour l'évaluation de la qualité des unités de projection 28, lequel est décrit dans ce qui suit en référence à la [fig.3].

- [0064] Plus précisément, un programme informatique est exécuté sur une unité de traitement centrale de l'unité de commande et d'analyse 20 qui amène le système de test 10 à exécuter le procédé décrit dans ce qui suit.
- [0065] Tout d'abord, au moins une partie prédéfinie d'au moins une des unités de projection 28 est illuminée par l'unité d'illumination 12 (étape S1). L'une des unités de projection 28 est par exemple entièrement illuminée alors que les autres unités de projection sur le wafer 26 ne sont pas illuminées.
- [0066] En alternative, seule une certaine partie de l'une des unités de projection 28 peut être illuminée, par exemple une partie présentant une certaine structure d'éléments optiques 30 dont la qualité doit être évaluée.
- [0067] Il est en alternative possible que plusieurs unités de projection 28 soient illuminées simultanément.
- [0068] Le cas dans lequel l'une des unités de projection 28 est complètement illuminée est décrit sans perte de généralité dans ce qui suit.
- [0069] En raison de l'illumination de l'unité de projection 28, une image est générée par l'unité de projection 28 et projetée sur l'écran 16. En d'autres termes, l'image 32 est générée par l'unité de projection 28 et projetée sur l'écran 16.
- [0070] L'image qui est générée au moins par la partie prédéfinie de l'unité de projection 28 peut être la même image, ou des parties de celle-ci, que l'unité de projection 28 générera lors de son utilisation prévue.
- [0071] En alternative ou en supplément, l'image peut également être générée en illuminant au moins la partie prédéfinie de l'unité de projection 28 de la même manière que lors de l'utilisation prévue de l'unité de projection 28.
- [0072] L'image générée par l'unité de projection 28 est ensuite saisie par le dispositif de saisie d'image 18 (étape S2). En règle générale, l'image saisie est une représentation numérique de l'image générée 32, l'image saisie comprenant plusieurs pixels présentant chacun une valeur de luminosité et/ou une valeur de couleur.
- [0073] Le dispositif de saisie d'image 18 peut par exemple être réalisé sous forme de caméra, en particulier de caméra à haute résolution.
- [0074] Il est également concevable que le dispositif de saisie d'image 18 soit intégré à l'écran 16. L'écran 16 peut par exemple comprendre des éléments photosensibles qui sont réalisés pour saisir l'image générée par l'unité de projection 28.
- [0075] L'image saisie est ensuite transmise à l'unité de commande et d'analyse 20, plus précisément au module d'analyse d'image 24, et analysée par le module d'analyse d'image 24 (étape S3).
- [0076] Le module d'analyse d'image 24 détermine alors au moins une grandeur caractéristique de l'image saisie sur la base de l'analyse de l'image (étape S4).
- [0077] De manière générale, ladite au moins une grandeur caractéristique est associée à la

qualité de l'unité de projection 28. Cela est dû au fait que des défauts du wafer 26 et/ou des défauts des éléments optiques 30 se manifestent par des défauts associés dans l'image, c'est-à-dire des défauts dans l'image générée 32.

- [0078] Par exemple, des écarts dans les positions des éléments optiques individuels 30, des écarts par rapport à une courbure souhaitée des éléments optiques individuels 30 et/ou des trous d'épingle dans le wafer 26 entraînent chacun des défauts caractéristiques associés dans l'image.
- [0079] Il s'est avéré qu'il existe plusieurs caractéristiques principales de l'image qui conviennent bien pour évaluer la qualité de l'unité de projection 28, à savoir la netteté, le niveau d'obscurité et l'uniformité, l'uniformité comprenant à son tour des fluctuations de luminosité, des fluctuations de fond et des défauts locaux. Une définition plus détaillée de ces caractéristiques d'image sera donnée dans ce qui suit.
- [0080] En conséquence, ladite au moins une grandeur caractéristique peut comprendre une ou plusieurs des grandeurs suivantes : netteté, niveau d'obscurité, uniformité, fluctuations de la luminosité, fluctuations du fond, défauts locaux, courbure des éléments optiques individuels 30, distance minimale entre les éléments optiques individuels 30, distance maximale entre les éléments optiques individuels 30 et/ou distance moyenne entre les éléments optiques individuels 30.
- [0081] Le module d'analyse d'image 24 détermine ladite au moins une grandeur caractéristique par une analyse de l'image qui est basée sur un procédé statistique et/ou un procédé d'apprentissage automatique.
- [0082] En d'autres termes, l'image peut être analysée par un procédé purement classique et déterministe basé sur des algorithmes classiques, c'est-à-dire des règles de calcul. D'autre part, l'image peut être analysée uniquement par un procédé d'apprentissage automatique ou par une combinaison des deux.
- [0083] Le cas de l'approche statistique sera expliqué plus en détail dans ce qui suit en référence aux figures 4 à 6.
- [0084] La [fig.4] montre de manière schématique les étapes qui sont suivies pour déterminer la netteté de l'image.
- [0085] Dans la première colonne de la [fig.4], deux images présentant le même motif sont montrées. Cependant, l'image de la première ligne est nette tandis que l'image de la deuxième ligne est floue.
- [0086] Une mesure pour la netteté de l'image est obtenue par la procédure suivante : d'abord, une transformation de Fourier rapide de l'image est déterminée (deuxième colonne de la [fig.4]). L'image transformée par Fourier est ensuite auto-corrélée (troisième colonne), et la transformation de Fourier rapide inverse de l'image auto-corrélée est déterminée (quatrième colonne).
- [0087] Une intensité moyenne, une intensité normalisée et/ou une intensité normalisée

moyenne du résultat de la transformée de Fourier inverse est déterminée, ce qui constitue une mesure pour la netteté de l'image originale. Ainsi, une intensité moyenne plus élevée est associée à une image plus nette, tandis qu'une intensité moyenne plus faible est associée à une image moins nette.

- [0088] Pour la normalisation, la valeur la plus élevée de l'image est par exemple normalisée en ce qui concerne la hauteur de l'image, la largeur de l'image, la valeur moyenne de l'image et/ou l'écart standard de l'image.
- [0089] La [fig.5] montre les principales étapes suivies pour obtenir la grandeur caractéristique "niveau d'obscurité". D'une manière générale, le niveau d'obscurité est la mesure pour la luminosité des zones de l'écran 16 qui ne doivent pas être illuminées, c'est-à-dire la luminosité des zones sombres 34.
- [0090] L'image à gauche de la [fig.5] montre l'image originale saisie par le dispositif de saisie d'image 18.
- [0091] Pour la détermination du niveau d'obscurité, un seuil de contraste par rapport au fond et/ou un seuil de luminosité est fixé afin de distinguer les zones illuminées 36 des zones sombres 34 (fond), comme l'illustre l'image de droite de la [fig.5]. En d'autres termes, chaque pixel de l'image saisie est classé en "illuminé" (zone pointillée) ou "non illuminé" (zone hachurée).
- [0092] Un niveau de luminosité moyen des pixels classés comme "non illuminés", c'est-à-dire un niveau de luminosité moyen et/ou un contraste moyen des zones sombres 34, est ensuite déterminé.
- [0093] Le niveau d'obscurité ne peut être déterminé que pour une région spécifique des zones sombres 34, c'est-à-dire pour une région dite d'intérêt.
- [0094] La [fig.6] illustre la manière dont la grandeur caractéristique "uniformité" est déterminée.
- [0095] Les bords des zones illuminées 36 sont tout d'abord déterminés de manière à pouvoir individuellement analyser la zone illuminée individuelle 36. Le résultat est montré à gauche de la [fig.6], où la zone illuminée 36 supérieure en forme de bande a été isolée.
- [0096] Ensuite, un filtre à masque 38 est appliqué à la zone illuminée 36 isolée, le filtre à masque présentant une taille prédéterminée et un seuil de luminosité prédéterminé. D'une manière générale, le filtre de masque 38 détermine le niveau de fluctuations du niveau de luminosité à l'intérieur de la taille prédéterminée du filtre à masque 38. Le filtre à masque 38 est alors appliqué successivement à l'ensemble de la zone illuminée 36.
- [0097] En d'autres termes, la grandeur caractéristique "uniformité" constitue une mesure pour les fluctuations locales de la luminosité ainsi que des fluctuations de fond dans les zones illuminées 36, et donc une mesure pour des défauts locaux de l'unité de projection respective 28 et/ou des éléments optiques respectifs 30.

- [0098] Sur la base de ladite au moins une grandeur caractéristique déterminée, l'unité de projection 28 est classée dans l'une d'au moins deux catégories de classe de qualité (étape S5).
- [0099] À cette fin, au moins un critère de qualité prédéterminé est fixé pour au moins l'une des grandeurs caractéristiques, en particulier pour plusieurs ou toutes les grandeurs caractéristiques. Ledit au moins un critère prédéterminé comprend par exemple un seuil pour la netteté de l'image et/ou un seuil respectif pour les autres grandeurs caractéristiques.
- [0100] L'unité de projection 28 peut être classée dans l'une de deux classes, à savoir "test de qualité réussi" et "test de qualité non réussi".
- [0101] L'unité de projection 28 respective est par exemple classée dans la classe "test de qualité non réussi" si au moins un critère de qualité n'est pas rempli. Par conséquent, l'unité de projection 28 respective est classée dans la classe "test de qualité réussi" si au moins un critère de qualité est rempli.
- [0102] Il peut bien entendu y avoir plus de deux classes de qualité. L'unité de projection respective est par exemple classée dans l'une des classes "niveau de qualité A", "niveau de qualité B" etc. selon qu'un ou plusieurs des critères de qualité sont remplis, et en fonction du critère de qualité qui est rempli.
- [0103] Les différentes applications de l'unité de projection 28 peuvent avoir des exigences différentes quant à la qualité de l'unité de projection 28. Ainsi, alors qu'une unité de projection 28 classée dans la classe "niveau de qualité C" peut ne pas convenir à une application particulière exigeant une qualité élevée de l'unité de projection 28, il peut y avoir une application pour laquelle la classe "niveau de qualité C" est suffisante. Il est ainsi possible de ne pas devoir rejeter l'unité de projection 28 mais simplement de l'attribuer à une application différente.
- [0104] La qualité de l'unité de projection 28 est de préférence évaluée lors de la fabrication des unités de projection 28.
- [0105] La qualité de l'unité de projection 28 est en particulier évaluée à la fin de la production de l'unité de projection 28, c'est-à-dire en fin de chaîne. Les paramètres du processus pour la ligne de production peuvent être adaptés sur la base du résultat de l'évaluation.
- [0106] En alternative, la qualité de l'unité de projection 28 est évaluée de manière répétée après des étapes intermédiaires de la fabrication de l'unité de projection 28. Sur la base de l'évaluation de la qualité, l'unité de projection 28 respective, si nécessaire, peut être rejetée à une phase plus précoce de la fabrication, ce qui permet d'économiser du temps de production et des ressources de production.
- [0107] Si l'unité de projection 28 n'est pas rejetée en raison de l'évaluation intermédiaire de la qualité, les paramètres du processus de production pour la fabrication ultérieure

peuvent être adaptés.

- [0108] Les explications données ci-dessus concernent les étapes S3 à S5 exécutées par une approche statistique classique.
- [0109] Toutefois, comme déjà mentionné ci-dessus, ces étapes peuvent également être exécutées par un procédé d'apprentissage automatique.
- [0110] L'unité de commande et d'analyse 20 ou plutôt le module d'analyse d'image 24 peut plus précisément comprendre un module d'apprentissage automatique qui est réalisé pour exécuter les étapes S3 à S5 décrites ci-dessus.
- [0111] Le module d'apprentissage automatique comprend alors un réseau de neurones artificiel, par exemple un réseau de neurones convolutif (CNN) et/ou un réseau de neurones récurrent (RNN) qui est pré-entraîné pour analyser l'image, déterminer ladite au moins une grandeur caractéristique, évaluer la qualité de l'unité de projection respective 28 et/ou affecter le dispositif sous test 14 à une classe.
- [0112] Il est bien entendu également possible d'utiliser tout autre type de réseau de neurones approprié.
- [0113] L'approche statistique et l'approche d'apprentissage automatique peuvent en outre être combinées.
- [0114] Le module d'apprentissage automatique peut en particulier être pré-entraîné avec des données obtenues en évaluant la qualité de l'unité de projection 28 par l'approche statistique.
- [0115] Plus précisément, plusieurs images échantillons sont analysées par l'approche statistique de la manière décrite ci-dessus. On obtient ainsi des données d'entraînement étiquetées qui comprennent les images échantillons d'une part et ladite au moins une grandeur caractéristique correspondant aux images échantillons respectives et/ou à la classe de qualité de l'unité de projection échantillon 28 respective d'autre part.
- [0116] Le module d'apprentissage automatique est alimenté avec les données d'entraînement étiquetées. Le module d'apprentissage automatique détermine ladite au moins une grandeur caractéristique et/ou classe l'image respective dans l'une des classes de qualité.
- [0117] Ensuite, les facteurs de pondération du module d'apprentissage automatique sont ajustés sur la base d'un écart de ladite au moins une grandeur caractéristique déterminée et/ou de la classe de qualité déterminée par rapport à une grandeur caractéristique réelle et/ou une classe de qualité réelle de l'unité de projection 28 qui a été déterminée par l'approche statistique.
- [0118] En résumé, le système de test 10 est configuré pour évaluer la qualité d'une unité de projection individuelle ou de plusieurs unités de projection 28 pendant la production des unités de projection 28. Sur la base de l'évaluation de la qualité, les unités de projection individuelles 28 sont classées en classes de qualité par une approche sta-

tistique, par un procédé d'apprentissage automatique ou par une combinaison des deux.

- [0119] En conséquence, le système de test 10 fournit une possibilité pour déterminer l'aptitude des unités de projection individuelles 28 pour les applications nécessitant certaines caractéristiques de qualité.

Revendications

- [Revendication 1] Procédé pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples (28), comprenant les étapes suivantes :
- illumination d'au moins une partie prédéfinie de l'unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde (28) de sorte qu'une image est générée par au moins deux canaux de la partie prédéfinie de l'unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples (28) ;
 - saisie de l'image générée par la partie prédéfinie de l'unité de projection (28) ;
 - analyse de l'image ;
 - détermination d'au moins une grandeur caractéristique sur la base de l'analyse de l'image, une valeur de la grandeur caractéristique étant associée à au moins une particularité caractéristique de l'unité de projection (28), à au moins un défaut de l'unité de projection (28) et/ou à au moins une classe de défauts de l'unité de projection (28) ; et
 - évaluation de la qualité de l'unité de projection (28) sur la base de ladite au moins une grandeur caractéristique.
- [Revendication 2] Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que ladite au moins une grandeur caractéristique comprend au moins l'une des suivantes : netteté, niveau d'obscurité, uniformité, fluctuations de luminosité, défauts locaux.
- [Revendication 3] Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'unité de projection micro-optique (28) est classée dans l'une d'au moins deux classes de qualité sur la base de ladite au moins une grandeur caractéristique.
- [Revendication 4] Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'unité de projection (28) comprend plusieurs éléments micro-optiques et/ou plusieurs éléments optiques sub-longueur d'onde (30), en particulier des micro-lentilles et/ou des lentilles sub-longueur d'onde, les éléments optiques (30) présentant en particulier une taille, une courbure, un masquage et/ou une position dans l'unité de projection (28), la taille, la courbure et/ou la position étant au moins l'une desdites au moins une particularités caractéristiques de l'unité de projection (28).
- [Revendication 5] Procédé selon la revendication 4, caractérisé en ce que les éléments optiques (30) forment un groupement, le groupement présentant une

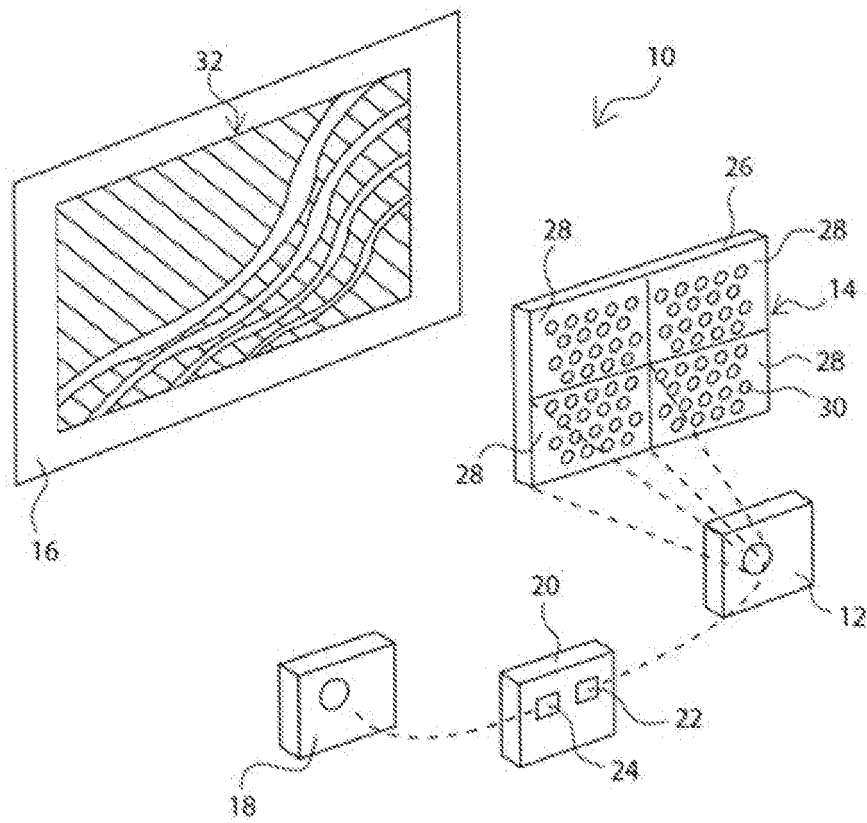
distance entre deux éléments optiques (30) voisins qui est au moins l'une desdites au moins une particularités caractéristiques de l'unité de projection (28).

- [Revendication 6] Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que la qualité de l'unité de projection (28) est évaluée pendant la fabrication de l'unité de projection (28), en particulier en fin de ligne.
- [Revendication 7] Procédé selon la revendication 6, caractérisé en ce que les paramètres de fabrication, en particulier au moins l'une des particularités caractéristiques, sont adaptés sur la base de l'évaluation de la qualité de l'unité de projection (28).
- [Revendication 8] Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce que l'image de l'unité de projection (28) est analysée par un procédé statistique et/ou par un module d'apprentissage automatique, le module d'apprentissage automatique comprenant en particulier un réseau de neurones artificiel pré-entraîné.
- [Revendication 9] Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que le module d'apprentissage automatique a été pré-entraîné avec des données d'entraînement étiquetées, les données d'entraînement étiquetées comprenant des images échantillons générées par la partie prédéfinie d'une unité de projection optique échantillon, et les données d'entraînement étiquetées comprenant ladite au moins une grandeur caractéristique correspondant aux images échantillons respectives et/ou à la classe de qualité de l'unité de projection échantillon respective.
- [Revendication 10] Procédé selon la revendication 9, caractérisé en ce que ladite au moins une grandeur caractéristique correspondant aux images échantillons respectives est obtenue en appliquant le procédé statistique aux images échantillons.
- [Revendication 11] Système de test pour l'évaluation de la qualité d'une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples (28), comprenant une unité d'illumination (12), un dispositif de saisie d'image (18), un module d'analyse d'image (24) et un module de commande (22), le module de commande (22) étant réalisé de manière à amener le système de test (10) à exécuter le procédé selon l'une des revendications précédentes.
- [Revendication 12] Système de test selon la revendication 11, caractérisé en ce que le système de test (10) comprend un dispositif sous test (14), le dispositif sous test (14) étant en particulier une unité de projection micro-optique et/ou de projection optique sub-longueur d'onde à canaux multiples

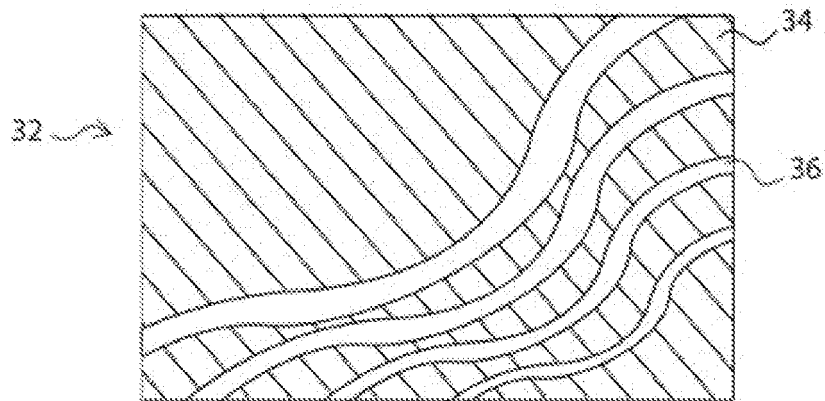
(28).

[Revendication 13] Programme informatique comprenant des instructions qui, lorsque le programme est exécuté par une unité de traitement du module de commande (22) du système de test (10) selon la revendication 11 ou 12, amènent le système de test (10) à exécuter les étapes du procédé selon l'une des revendications 1 à 10.

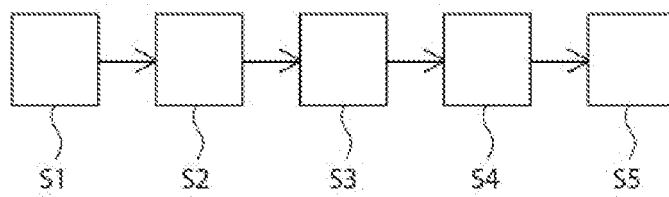
[Fig. 1]



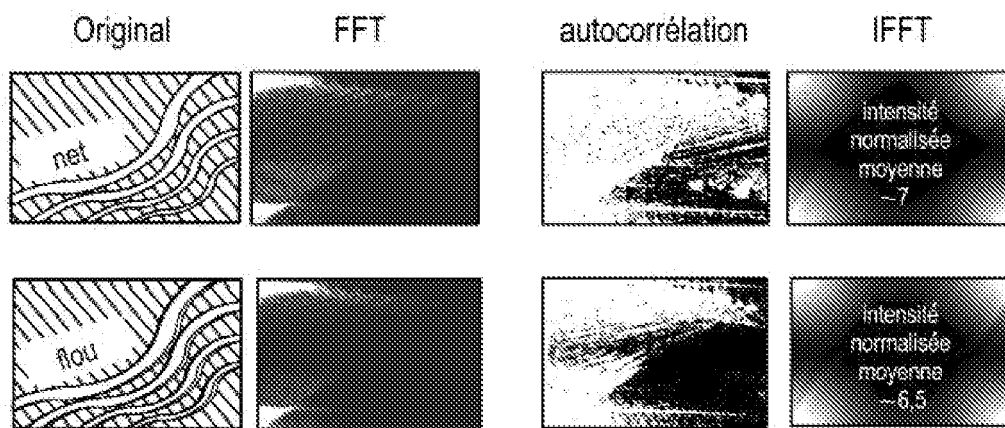
[Fig. 2]



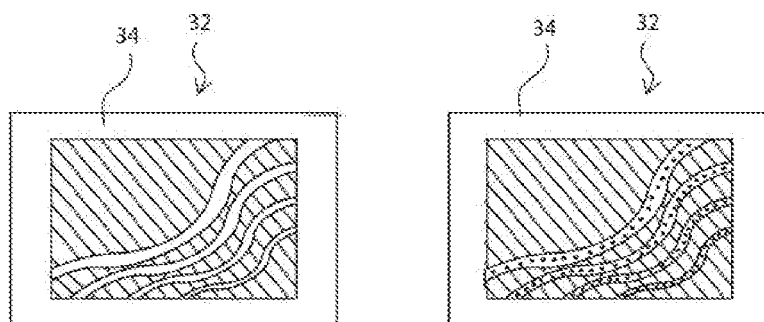
[Fig. 3]



[Fig. 4]



[Fig. 5]



[Fig. 6]

