

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

(19) Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle  
Bureau international



(43) Date de la publication internationale  
10 mai 2012 (10.05.2012)

(10) Numéro de publication internationale  
**WO 2012/059676 A2**

PCT

- (51) Classification internationale des brevets :  
*G02B 9/16* (2006.01)      *G02B 13/18* (2006.01)  
*G02B 13/00* (2006.01)      *G02B 9/34* (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :  
PCT/FR2011/052542
- (22) Date de dépôt international :  
28 octobre 2011 (28.10.2011)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :  
1058991      2 novembre 2010 (02.11.2010)      FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :  
**COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES** [FR/FR];  
Bâtiment Le Ponant D, 25, Rue Leblanc, F-75015 Paris (FR).
- (72) Inventeur; et
- (75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : **PORNIN, Cyrille** [FR/FR]; 63, Rue des Iles, F-38920 Crolles (FR).
- (74) Mandataire : **CABINET BEAUMONT**; 1, Rue Champollion, F-38000 Grenoble (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, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Publiée :  
— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport (règle 48.2.g)

(54) Title : OPTICAL SYSTEM FOR FORMING AN IMAGE ON A CONCAVE SPHERICAL SURFACE

(54) Titre : SYSTEME OPTIQUE DE FORMATION D'IMAGE SUR UNE SURFACE SPHERIQUE CONCAVE

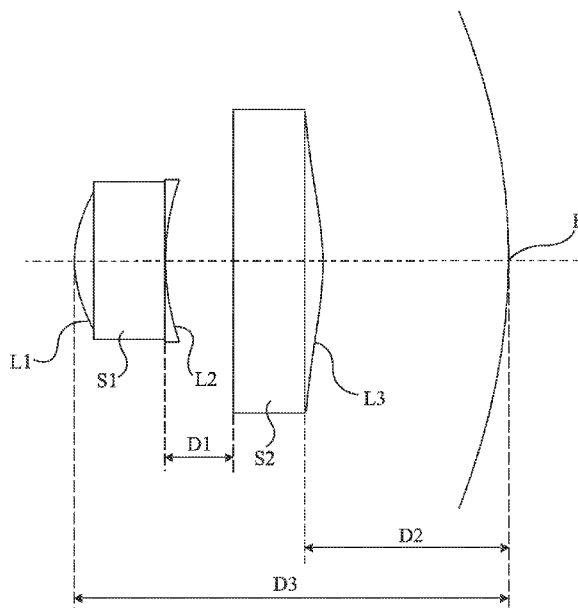


Fig 2

(57) Abstract : The invention relates to an optical system for forming an image on a concave spherical surface comprising, perpendicularly to the optical axis of the spherical surface, starting from the object side: a first elliptical plano-convex lens (L1) with convexity directed towards the object side; a second aspherical plano-concave lens (L2) whose radius of curvature decreases with distance from the axis, with concavity directed towards the image side, made of a material with a smaller Abbe number than that of the first lens; a parallel-faced plate (S1) on which bear the planar faces of the first and second lenses; a third aspherical plano-convex/concave lens (L3) exhibiting a convex shape in its central part and a concave shape at its periphery.

(57) Abrégé : L'invention concerne un système optique de formation d'image sur une surface sphérique concave comprenant, perpendiculairement à l'axe optique de la surface sphérique, à partir du côté objet: une première lentille (L1) plan-convexe elliptique à convexité tournée vers le côté objet; une deuxième lentille (L2) plan-concave asphérique dont le rayon de

courbure diminue avec l'écart à l'axe, à concavité

[Suite sur la page suivante]

WO 2012/059676 A2

---

turnée vers le côté image, en un matériau à nombre d'Abbe inférieur à celui de la première lentille; une lame à face parallèle (S1) sur laquelle s'appuient les faces planes des première et deuxième lentilles; une troisième lentille (L3) plan-convexo/concave asphérique présentant une forme convexe dans sa partie centrale et une forme concave à sa périphérie.

**SYSTEME OPTIQUE DE FORMATION D'IMAGE SUR UNE SURFACE SPHERIQUE  
CONCAVE**

Domaine de l'invention

La présente invention concerne un système optique adapté à former une image sur une surface sphérique concave. Elle s'applique notamment au cas où la surface sphérique concave  
5 comporte une matrice de pixels adaptée à constituer le détecteur d'un dispositif numérique de prise d'image, utilisable par exemple dans un appareil portable.

Exposé de l'art antérieur

Comme l'illustre la figure 1, quand on utilise un  
10 objectif 1, des rayons parallèles axiaux 3 forment une image focalisée en un point F situé sur un plan image 5. Par contre, si l'ouverture de champ est importante, on ne peut pas considérer que des rayons non axiaux 7 se focalisent sur un plan focal. Au lieu de cela, ces rayons non axiaux se focalisent en  
15 des points, tels que le point F', situés sur une surface de focalisation 9 qui est généralement une portion de sphère.

Si on veut que l'image se forme effectivement sur une surface focale plane, on est amené à utiliser un système optique complexe tel que celui décrit par exemple dans le brevet des  
20 Etats-Unis d'Amérique 7 180 687 qui comprend un objectif comportant six surfaces de lentilles asphériques complexes pour

corriger les défauts de courbure de champ, et les diverses aberrations et distorsions inhérentes à un système optique.

Il a été proposé, par exemple dans le brevet des Etats-Unis d'Amérique 4 467 361, un système de prise de vue dans lequel l'image est formée sur une surface sphérique concave. Ce système consiste essentiellement en une lentille boule. Un inconvénient de telles lentilles boules, outre le fait qu'elles n'assurent pas une très bonne correction de distorsion, est que leur fabrication est incompatible avec les procédés collectifs développés pour fabriquer des lentilles par dépôt d'une couche sur une lame transparente, formation simultanée d'un grand nombre de lentilles identiques par moulage, assemblage et découpe en objectifs individuels. Ces procédés collectifs sont par exemple décrits dans un document intitulé "wafer-level cameras" de Margaret Zoberbier et al présenté au International Image Sensor Workshop, Bergen, Norway 2009.

Le brevet US 7688531 décrit un système de formation d'images sur une surface plane et vise essentiellement à effectuer des corrections d'astigmatisme, mais ne concerne pas les aberrations de courbure de champs.

Ainsi, les systèmes connus présentent divers inconvénients.

#### Résumé

Un objet de modes de réalisation de la présente invention est de pallier les inconvénients des systèmes connus et plus particulièrement de prévoir un objectif susceptible de former une image sur une surface sphérique concave, corrigée des diverses aberrations et distorsions inhérentes aux systèmes optiques courants en utilisant un minimum de surfaces de lentilles.

Un autre objet de modes de réalisation de la présente invention est de prévoir un tel objectif fabricable par un procédé collectif de fabrication de lentilles sur des lames transparentes.

Pour atteindre ces objets ainsi que d'autres, la présente invention prévoit un système optique de formation d'image sur une surface sphérique concave comprenant, perpendiculairement à l'axe optique de la surface sphérique, à partir du côté objet : une première lentille plan-convexe elliptique à convexité tournée vers le côté objet ; une deuxième lentille plan-concave asphérique dont le rayon de courbure diminue avec l'écart à l'axe, à concavité tournée vers le côté image, en un matériau à nombre d'Abbe inférieur à celui de la première lentille ; une lame à face parallèle sur laquelle s'appuient les faces planes des première et deuxième lentilles ; et une troisième lentille plan-convexo/concave asphérique présentant une forme convexe dans sa partie centrale et une forme concave à sa périphérie.

15 Brève description des dessins

Ces objets, caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

20 la figure 1 représente un système optique classique ;

la figure 2 représente un système optique selon un mode de réalisation de la présente invention ;

la figure 3 est une vue détaillée d'un mode de réalisation d'une des lentilles d'un système optique selon la présente invention ; et

la figure 4 est une vue d'une visualisation fournie par un logiciel de simulation de système optique tel que le logiciel ZEMAX.

Description détaillée

30 On rappellera au préalable qu'un concepteur de système optique utilise aujourd'hui couramment des programmes de conception. Un exemple d'un tel programme est le programme ZEMAX de Zemax Development Corp. vendu en Europe par Optima Research Ltd., pouvant être acheté sur le site [www.zemax.com](http://www.zemax.com). Un autre

exemple d'outil d'aide à la conception optique est le programme OSLO de Lambda Research Corp.

On considèrera ici plus particulièrement à titre d'exemple le programme ZEMAX. Le programme ZEMAX permet, dans un premier temps, quand on a prévu de façon générale les composants d'un système optique, de visualiser les fronts d'onde fournis par ce système optique. Ainsi, le concepteur d'un système optique peut :

- prévoir un système optique initial contenant un nombre déterminé de surfaces de lentilles ayant des allures générales données,
- visualiser les fronts d'onde,
- retoucher divers éléments de son système,
- visualiser en temps réel les modifications résultantes des fronts d'onde,
- répéter les deux dernières étapes pour arriver à un modèle approché.

Dans un deuxième temps, une fois que le modèle approché est proche d'un optimum, le logiciel ZEMAX comprend un système d'optimisation qui fournit des paramètres exacts et précis d'un système optique optimisé ayant une fonction de transfert de modulation satisfaisant à des critères déterminés. Ces critères correspondent à l'obtention d'une image nette dans laquelle on peut distinguer avec un contraste supérieur à 50 % une alternance de traits noirs et blancs à une période souhaitée et pour un angle de champ souhaité. Ici, on considèrera que l'image est nette quand la "période souhaitée" est de l'ordre de  $10 \lambda.N$ ,  $\lambda$  étant la longueur d'onde de la lumière et  $N = f/d$  étant le nombre d'ouverture du système optique ( $f =$  distance focale et  $d =$  diamètre de la pupille de sortie) et que le demi angle de champ est de l'ordre de  $30^\circ$ .

Néanmoins, bien entendu, pour pouvoir arriver à un modèle initial puis à un système optique optimisé, il faut d'abord que le concepteur ait proposé un système optique approché qui puisse amener le logiciel à converger.

Dans le cas présent, l'inventeur propose un système optique à seulement trois lentilles tel que représenté en figure 2 pour fournir une image nette sur un détecteur formé sur une portion de sphère concave de focalisation. Ce système comprend  
5 une première lentille plan-convexe L1 et une deuxième lentille plan-concave L2 disposées de part et d'autre d'une lame transparente S1, et une troisième lentille L3 formée sur une lame transparente S2. La distance axiale entre la face arrière de la lame S1 et la face avant de la lame S2 est égale à D1. La  
10 distance axiale entre la face arrière de la lame S2 et le point focal axial est égale à D2. La distance axiale entre la face avant de la lentille L1 et le point focal axial F est égale à D3.

La première lentille L1 est une lentille plan-convexe  
15 elliptique, à convexité tournée vers le côté objet. La deuxième lentille L2 est une lentille plan-concave asphérique dont le rayon de courbure diminue avec l'écart à l'axe, à concavité tournée vers le côté image. La lentille L2 est en un matériau à nombre d'Abbe distinct de celui de la première lentille L1 pour  
20 permettre une correction des aberrations chromatiques.

L'association d'une lentille convergente L1 avec une lentille divergente L2 forme un doublet achromatique (les aberrations chromatiques qui apparaissent sur la lentille L1 sont compensées par la lentille L2). Les aberrations sphériques dues  
25 à L1 sont également compensées par L2 du fait du signe de leurs distances focales opposées. L'aberration de coma est quant-à-elle minimisée sur les deux lentilles grâce à une asphérisation de ces dernières.

La lentille L3 permet le contrôle de la distorsion  
30 (compression ou étirement de l'image), et corrige l'astigmatisme (dédoublément de la surface de focalisation selon le plan dans lequel se propagent les rayons lumineux). Pour cela elle est également asphérisée. Ses faibles courbures permettent également d'ajuster la distance focale.

La figure 3 représente l'allure générale de la troisième lentille L3. Cette lentille L3 est une lentille dont une face est plane et l'autre est asphérique avec une forme convexe dans sa partie centrale et une forme concave à sa périphérie. Cette lentille a une ouverture effective  $d_{L3}$ . Dans la vue en coupe, un point d'inflexion 11 sépare les parties convexe et concave.

Une fois effectué ce choix fondamental de nombre, de disposition et de formes des lentilles L1, L2, L3, définissant un système optique initial, l'homme de l'art peut soumettre le système optique initial à des premières simulations dans un outil d'aide à la conception optique et visualiser les fronts d'onde résultants.

La figure 4 représente l'image que l'on obtient sur un écran quand on soumet le dispositif à une simulation ZEMAX. La figure 4 correspond à un dispositif finalisé pour lequel l'image obtenue est effectivement bien focalisée sur la surface du détecteur concave 9. Dans cette figure, le point F correspond au foyer axial et les points F1, F2... Fn correspondent à des foyers successifs hors d'axe correspondant aux diverses inclinaisons du faisceau incident.

On comprendra qu'avant d'arriver à la visualisation illustrée en figure 4, on est parti du système optique initial tel que défini précédemment dans lequel les divers faisceaux ne convergent pas convenablement sur le détecteur sphérique. Le concepteur du système modifiera successivement divers paramètres des diverses lentilles pour arriver à cette finalisation. Grâce au programme ZEMAX, l'observation de la variation des points de convergence peut se faire en temps réel. On arrive par cette simulation à une structure quasi finalisée (modèle approché) qui est soumise à un programme d'optimisation ultérieur. On soulignera que cette finalisation et cette convergence du programme vers le modèle initial ne sont possibles que parce qu'on a choisi un système à trois lentilles seulement présentant les caractéristiques énoncées ci-dessus.

Pour une lentille asphérique de révolution  $i$  d'axe  $z$ , on peut définir la valeur axiale  $z$  en tout point de la surface en fonction de la distance radiale  $r$  par l'expression suivante :

$$z_i(r) = \frac{r^2 / R_i}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_i) (r / R_i)^2}} + A_{i2}r^2 + A_{i4}r^4 + \dots$$

5 où  $k_i$ ,  $R_i$  et  $A_{ij}$  sont des paramètres caractéristiques de la lentille  $i$ ,  $k_i$  étant une constante de conicité,  $R_i$  un rayon de courbure, et  $A_{ij}$  un coefficient d'asphéricité.

Après la première opération d'optimisation faite par approximations successives en partant des formes énoncées précédemment, et en appelant  $f$  la distance focale du système optique, on arrive à une définition du modèle approché du système optique initial, telle que présentée ci-après. Les valeurs indiquées sont données à 10 % près.

- lentille L1

15 rayon :  $R_1 = 0,4 * f$  (convexe)

$K_1 = 0,3$  (ellipse)

épaisseur au centre: fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$ .

- lentille L2

20 rayon :  $R_2 = f$  (concave)

$A_{24} = 2,4 * f^{-3}$

$A_{26} = 38 * f^{-5}$

épaisseur au centre: 10  $\mu\text{m}$

- lentille L3

25  $A_{32} = -0,47 * f^{-1}$

$A_{34} = 1,16 * f^{-3}$

$A_{36} = -0,6 * f^{-5}$

épaisseur au centre: fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$

30 l'anneau d'inflexion entre la partie convexe et la partie concave est compris entre 0,6 et 0,8 de la valeur du rayon utile de cette lentille.

- lames S1, S2

épaisseur  $e = 0,2 * f$

$$D1 = 0,18 * f$$

$$D2 = 0,57 * f$$

- détecteur

rayon de courbure :  $R_c = -1,8 * f$  (concave).

5 Afin de diminuer les aberrations chromatiques, la lentille L2 est composée d'un matériau moins contraignant que celui des lentilles L1 et L3.

Pour les exemples suivants, les lentilles L1 et L3 sont en PMMA (polyméthylméthacrylate) et la lentille L2 est en  
10 PC (polycarbonate). Les lames sur lesquelles les lentilles sont déposées sont en verre (D263T de chez Schott).

Le PMMA a, pour une longueur d'onde de 587,56 nm, un indice de réfraction  $N_d$  égal à 1,4914 et un nombre d'Abbe  $V_d$  égal à 52,6.

15 Le PC a, pour une longueur d'onde de 587,56 nm, un indice de réfraction  $N_d$  égal à 1,5849 et un nombre d'Abbe  $V_d$  égal à 27,56.

Le D263T (Schott) a, pour une longueur d'onde de 587,56 nm, un indice de réfraction  $N_d$  égal à 1,5228 et un nombre  
20 d'Abbe  $V_d$  égal à 57,4951.

On va maintenant donner trois exemples d'optimisation du modèle approché défini ci-dessus pour trois valeurs de la distance focale  $f$ .

#### EXEMPLE 1

25 On désire une combinaison optique dont la distance focale est de 3 mm. Les paramètres du modèle approché sont donc :

- lentille L1 :  $R_1=1,2$  mm,  $K_1=0,3$ , épaisseur au centre: fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$
- lentille L2 :  $R_2=3$  mm,  $A_{24}=0,0889$  mm<sup>-3</sup>,  $A_{26}=0,156$  mm<sup>-5</sup>, épaisseur au centre égale à 10  $\mu\text{m}$
- 30 - lentille L3 :  $A_{32}=-0,157$  mm<sup>-1</sup>,  $A_{34}=0,0430$  mm<sup>-3</sup>,  $A_{36}=0,00247$  mm<sup>-5</sup>, épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$
- lames S1, S2 :  $e=0,6$  mm,  $D1=0,54$  mm,  $D2=1,71$  mm
- 35 - détecteur :  $R_c=-5,4$  mm.

Après optimisation des paramètres, on obtient finalement la configuration suivante :

lentille L1

$$R_1 = 1,213 \text{ mm}$$

$$5 \quad K_1 = 0,324$$

épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$

lentille L2

$$R_2 = 3,029 \text{ mm}$$

$$10 \quad A_{24} = 0,0910 \text{ mm}^{-3}$$

$$A_{26} = 0,163 \text{ mm}^{-5}$$

épaisseur au centre : 10  $\mu\text{m}$

lentille L3

$$A_{32} = -0,1582 \text{ mm}^{-1}$$

$$15 \quad A_{34} = 0,0427 \text{ mm}^{-3}$$

$$A_{36} = -0,00248 \text{ mm}^{-5}$$

épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$

lames S1, S2

$$20 \quad e = 0,6 \text{ mm}$$

$$D1 = 0,572 \text{ mm}$$

$$D2 = 1,708 \text{ mm}$$

détecteur

$$R_c = -5,432 \text{ mm.}$$

25 EXEMPLE 2

On désire une combinaison optique dont la distance focale est de 1,5 mm. Les paramètres du modèle approché sont donc :

- 30 - lentille L1 :  $R_1=0,6 \text{ mm}$ ,  $K_1=0,3$ , épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$
- lentille L2 :  $R_2=1,5 \text{ mm}$ ,  $A_{24}=0,711 \text{ mm}^{-3}$ ,  $A_{26}=5,0 \text{ mm}^{-5}$ , épaisseur au centre égale à 10  $\mu\text{m}$
- lentille L3 :  $A_{32}=-0,313 \text{ mm}^{-1}$ ,  $A_{34}=0,344 \text{ mm}^{-3}$ ,  $A_{36}=0,079 \text{ mm}^{-5}$ , épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord
- 35 de 10  $\mu\text{m}$

10

- lames S1,S2 :  $e=0,3$  mm,  $D1=0,27$  mm,  $D2=0,855$  mm
- détecteur :  $Rc=-2,7$  mm.

Après optimisation des paramètres, on obtient finalement la configuration suivante :

- 5            lentille L1  
 $R_1 = 0,610$  mm  
 $K_1 = 0,302$   
 épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale  
 au bord de  $10 \mu\text{m}$
- 10           lentille L2  
 $R_2 = 1,540$  mm  
 $A_{24} = 0,7176 \text{ mm}^{-3}$   
 $A_{26} = 4,878 \text{ mm}^{-5}$   
 épaisseur au centre égale à  $10 \mu\text{m}$
- 15           lentille L3  
 $A_{32} = -0,3154 \text{ mm}^{-1}$   
 $A_{34} = 0,3438 \text{ mm}^{-3}$   
 $A_{36} = -0,0662 \text{ mm}^{-5}$   
 épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale  
 au bord de  $10 \mu\text{m}$
- 20           lames S1, S2  
 $e = 0,3$  mm  
 $D1 = 0,2834$  mm  
 $D2 = 0,855$  mm
- 25           détecteur  
 $Rc = -2,712$  mm.

EXEMPLE 3 :

- On désire une combinaison optique dont la distance focale est de  $5$  mm. Les paramètres du modèle approché sont donc :
- 30 - lentille L1,  $R_1=2$  mm,  $K_1=0,3$ , épaisseur au centre: fixée par une épaisseur minimale au bord de  $10 \mu\text{m}$
- lentille L2:  $R_2=5$  mm,  $A_{24}=0,0192 \text{ mm}^{-3}$ ,  $A_{26}=0,012 \text{ mm}^{-5}$ , épaisseur au centre:  $10 \mu\text{m}$

11

- lentille L3 :  $A_{32} = -0,094 \text{ mm}^{-1}$ ,  $A_{34} = 0,00928 \text{ mm}^{-3}$ ,  $A_{36} = 0,000206 \text{ mm}^{-5}$ , épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord de  $10 \text{ }\mu\text{m}$
  - lames S1, S2 :  $e = 1 \text{ mm}$ ,  $D1 = 0,9 \text{ mm}$ ,  $D2 = 2,85 \text{ mm}$
- 5 - détecteur :  $R_c = -9 \text{ mm}$ .

Après optimisation des paramètres, on obtient finalement la configuration suivante :

lentille L1

$$R_1 = 2,016 \text{ mm}$$

10  $K_1 = 0,333$

épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord de  $10 \text{ }\mu\text{m}$

lentille L2

$$R_2 = 5,015 \text{ mm}$$

15  $A_{24} = 0,01975 \text{ mm}^{-3}$

$$A_{26} = 0,01301 \text{ mm}^{-5}$$

épaisseur au centre égale à  $10 \text{ }\mu\text{m}$

lentille L3

$$A_{32} = -0,09501 \text{ mm}^{-1}$$

20  $A_{34} = 0,009208 \text{ mm}^{-3}$

$$A_{36} = -0,0002058 \text{ mm}^{-5}$$

épaisseur au centre fixée par une épaisseur minimale au bord de  $10 \text{ }\mu\text{m}$

lames S1, S2

25  $e = 0,9 \text{ mm}$

$$D1 = 0,957 \text{ mm}$$

$$D2 = 2,8442 \text{ mm}$$

détecteur

$$R_c = -9,058 \text{ mm}.$$

30 Des modes de réalisation particuliers de la présente invention ont été décrits. Diverses variantes et modifications apparaîtront à l'homme de l'art.

**REVENDICATIONS**

1. Système optique de formation d'image sur une surface sphérique concave comprenant, perpendiculairement à l'axe optique de la surface sphérique, à partir du côté objet :

5 une première lentille (L1) plan-convexe elliptique à convexité tournée vers le côté objet ;

une deuxième lentille (L2) plan-concave asphérique dont le rayon de courbure diminue avec l'écart à l'axe, à concavité tournée vers le côté image, en un matériau à nombre d'Abbe inférieur à celui de la première lentille ;

10 une lame à face parallèle (S1) sur laquelle s'appuient les faces planes des première et deuxième lentilles ; et

une troisième lentille (L3) plan-convexo/concave asphérique présentant une forme convexe dans sa partie centrale et une forme concave à sa périphérie.

15 2. Système optique selon la revendication 1, dans lequel l'anneau d'inflexion entre la partie convexe et la partie concave de la troisième lentille est compris entre 0,6 et 0,8 de la valeur du rayon utile de cette lentille.

20 3. Système optique selon la revendication 1, dans lequel les première et troisième lentilles (L1 et L3) sont en PMMA (polyméthylméthacrylate) et la deuxième lentille (L2) est en PC (polycarbonate), les lames sur lesquelles les lentilles sont déposées étant en verre.

25 4. Système optique selon la revendication 1, dans lequel les divers éléments sont caractérisés, à 10 % près, par les paramètres suivants

- lentille L1

$$R1 = 0,4 * f \text{ (convexe)}$$

$$K_1 = 0,3 \text{ (ellipse)}$$

30 épaisseur au centre: fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$ .

- lentille L2

$$R2 = f \text{ (concave)}$$

$$A_{24} = 2,4 * f^{-3}$$

13

$$A_{26} = 38 * f^{-5}$$

épaisseur au centre: 10  $\mu\text{m}$

- lentille L3

$$A_{32} = -0,47 * f^{-1}$$

$$5 \quad A_{34} = 1,16 * f^{-3}$$

$$A_{36} = -0,6 * f^{-5}$$

épaisseur au centre: fixée par une épaisseur minimale au bord de 10  $\mu\text{m}$ .

- lames S1, S2 (la lentille L3 repose sur une lame S2)

$$10 \quad e = 0,2 * f$$

$$D1 = 0,18 * f$$

$$D2 = 0,57 * f$$

- détecteur

$$R_c = -1,8 * f \text{ (concave)}$$

15 où  $f$  désigne la distance focale du système optique et où les paramètres  $R$ ,  $A$  et  $K$  correspondent à la définition de la forme d'une lentille donnée par l'équation suivante :

$$z_i(r) = \frac{r^2 / R_i}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_i) (r / R_i)^2}} + A_{i2}r^2 + A_{i4}r^4 + \dots$$

20 où  $k_i$ ,  $R_i$  et  $A_{ij}$  sont des paramètres caractéristiques de la lentille  $i$ ,  $k_i$  étant une constante de conicité,  $R_i$  un rayon de courbure, et  $A_{ij}$  un coefficient d'asphéricité.

5. Système optique selon la revendication 1, dans lequel les lentilles sont formées sur des plaques, assemblées en objectifs individuels et découpées.

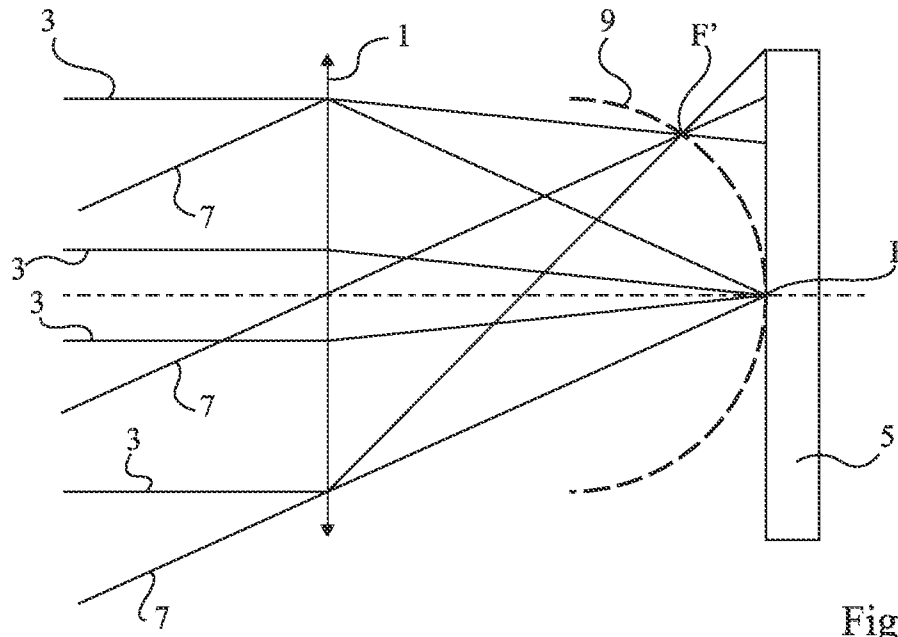


Fig 1

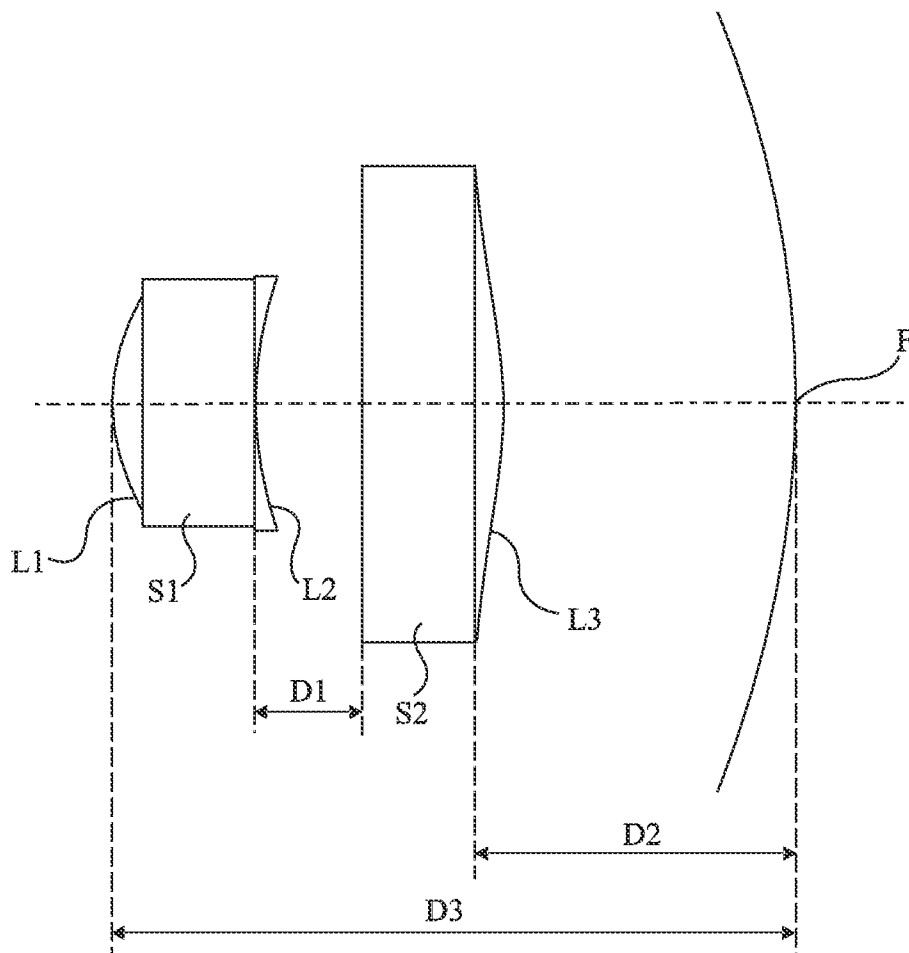


Fig 2

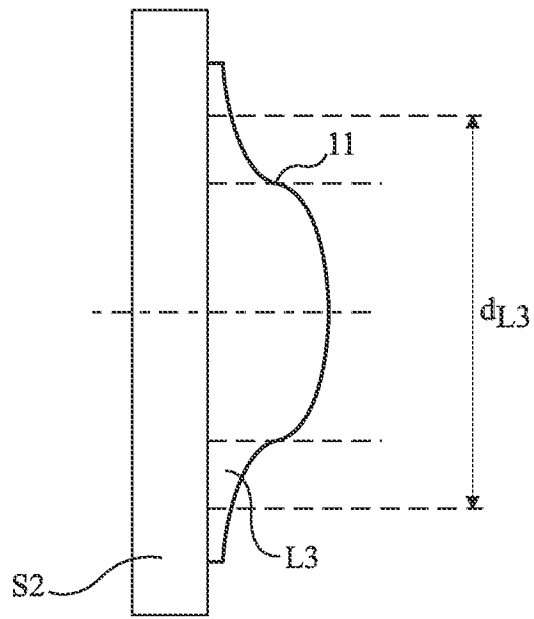


Fig 3

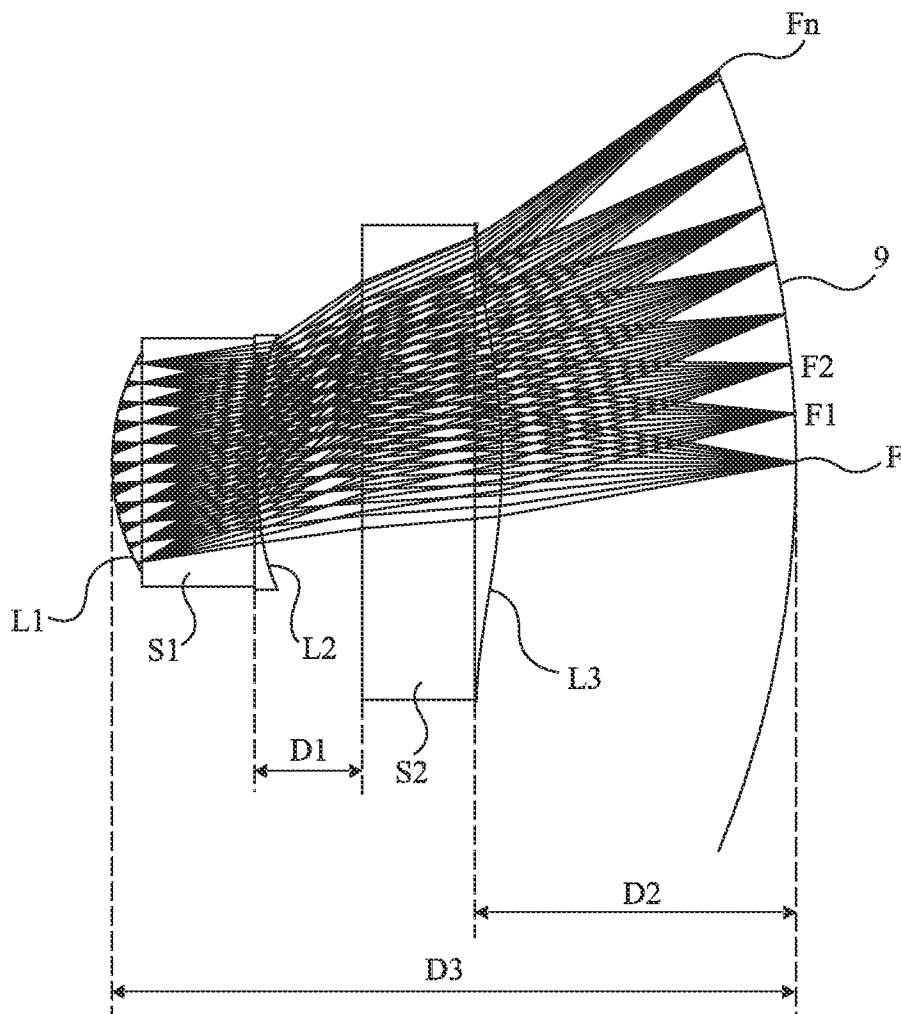


Fig 4