



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 270 659**

② Número de solicitud: 200401397

⑤ Int. Cl.:  
**G02B 27/46** (2006.01)

⑫

PATENTE DE INVENCION

B1

② Fecha de presentación: **09.06.2004**

④ Fecha de publicación de la solicitud: **01.04.2007**

Fecha de la concesión: **28.02.2008**

④ Fecha de anuncio de la concesión: **16.03.2008**

④ Fecha de publicación del folleto de la patente:  
**16.03.2008**

⑦ Titular/es:  
**Consejo Superior de Investigaciones Científicas  
c/ Serrano, 117  
28006 Madrid, ES  
Universidad de Santiago de Compostela**

⑦ Inventor/es: **Navarro Belsué, Rafael;  
Rodríguez Pérez, Pablo;  
Arines Piferrer, Justo y  
Bará Viñas, Salvador X.**

⑦ Agente: **No consta**

⑤ Título: **Conjunto de láminas de fase y sus procedimientos de uso en calibraciones y ensayos ópticos.**

⑤ Resumen:

Conjunto de láminas de fase y sus procedimientos de uso en calibraciones y ensayos ópticos.

La invención consiste en un conjunto de elementos ópticos, denominados láminas de fase, cada uno de los cuales produce un tipo, o modo específico de aberración con valor determinado, para ser utilizado en la verificación y calibración de aberrómetros ópticos. La fabricación se realiza mediante métodos mecánicos, ópticos o de cualquier otra naturaleza. En particular, métodos ópticos son la fotoescultura en un medio fotosensible o el tallado con láser. Se trata de obtener un perfil refractivo que introduce localmente la fase requerida para generar la aberración que se desea. Las principales aplicaciones son, la calibración de aberrómetros y la realización de modelos de sistemas ópticos. En ambos casos, la invención se aplica tanto al campo del diseño y fabricación de sistemas ópticos, como, al de la optometría y oftalmología en la óptica ocular.

ES 2 270 659 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

## DESCRIPCIÓN

Conjunto de láminas de fase y sus procedimientos de uso en calibraciones y ensayos ópticos.

### Sector de la técnica

La invención se dirige fundamentalmente a dos sectores. En primer lugar el sector de las tecnologías ópticas, donde sea necesaria bien la calibración de sistemas de medida de aberraciones ópticas (aberrómetros), bien la realización de modelos ópticos, prototipos, demostradores, etc. En segundo lugar el campo de la optometría y la oftalmología, bien para la calibración de aberrómetros oculares, bien para la realización de modelos ópticos del ojo con fines clínicos, de investigación o docencia.

### Estado de la técnica

Las aberraciones ópticas suponen la mayor limitación a la calidad de los instrumentos ópticos. En el caso del ojo humano, las aberraciones limitan la calidad visual. De hecho los errores refractivos, miopía, astigmatismo, etc., que se corrigen habitualmente con lentes oftálmicas o incluso cirugía, corresponden a las aberraciones de segundo orden. Por lo tanto, la medida de las aberraciones ópticas es uno de los tests de calidad más importantes, tanto en la fabricación de instrumentos y sistemas ópticos, como al realizar un examen completo de la visión de un paciente. Aunque conocida desde hace mucho, la aplicación habitual de la aberrometría como tal es relativamente reciente, habiéndose producido grandes avances sobre todo en los campos de los grandes telescopios y últimamente en la oftalmología. En cuanto a la fabricación y control de instrumentos ópticos, se han usado diferentes métodos. Aunque los más tradicionales son los interferométricos, es de prever que la aberrometría (sensores de Hartmann-Shack, trazado de rayos con láser, etc.) se imponga en el futuro por su robustez y versatilidad. Ahora bien, los aberrómetros son instrumentos de precisión y como tales, requieren una perfecta calibración, que además conviene verificar periódicamente. Con mayor razón en el caso de los aberrómetros oculares, puesto que se aplican tratamientos quirúrgicos basados en las medidas aberrométricas. En este caso, la verificación o calibración se ha venido realizando usando modelos ópticos del ojo, llamados ojos artificiales, bien comparando las medidas proporcionadas por diferentes aberrómetros, o bien introduciendo errores refractivos de distinta magnitud. Sin embargo, hasta la fecha, estos errores refractivos (aberraciones) se introducían utilizando una o más lentes oftálmicas de prueba generando así miopía, hipermetropía y/o astigmatismo. Es decir, estaban limitados a aberraciones de segundo orden. Algunos autores han sugerido generar coma (tercer orden) descentrando las lentes oftálmicas, y existen algunas soluciones para generar aberración esférica de forma más o menos controlada. Pero esto no resuelve el problema general, dado que hay modos de orden relativamente bajo (trébol de 3er orden) que no pueden generarse mediante los métodos propuestos y que además se dan con mucha frecuencia en el ojo humano. Por otro lado, el restringir las calibraciones al segundo orden carece de interés en optometría y oftalmología, dado que la aberrometría se usa para medir aberraciones de tercer orden y superior. Por lo tanto existe un vacío en el estado actual de la técnica que pretendemos cubrir con la presente invención. Si se soluciona el problema de generar modos espe-

cíficos de aberración, con diferentes magnitudes, esto abre además la posibilidad de otras aplicaciones, fundamentalmente en la realización de modelos ópticos, prototipos, demostradores, etc.

5 Una invención anterior (patente número de registro P 200000335, publicada en el B.O.P.I. 1 del 3 de 2003), consistió en unos elementos ópticos, laminas de fase para compensar las aberraciones oculares de alto y bajo orden y de un procedimiento para su fabricación. La idea consiste en utilizar el mismo tipo de 10 elementos ópticos adaptándolos a la presente aplicación.

### Descripción de la invención

15 La presente invención da una solución a la necesidad de disponer, de forma sencilla, precisa y con un coste asumible, de un conjunto variado de modos de aberración y de cubrir un rango de magnitudes o valores.

20 Consiste en un conjunto, o juego de elementos ópticos, denominados láminas de fase, cada uno de los cuales produce un tipo, o modo específico de aberración con valor determinado. Existen varios esquemas o marcos teóricos para clasificar las aberraciones ópticas. Entre los más usados está la descripción modal, 25 en las cuales cualquier patrón de aberraciones puede descomponerse en una serie de modos (desenfoque, astigmatismo, coma, esférica, etc.), cada uno de los cuales se presenta con una determinada magnitud (por ejemplo: 0.5 micras de aberración esférica). En general, cada modo queda descrito por una expresión matemática, usualmente un polinomio, de tal manera que los modos se clasifican por órdenes, atendiendo al grado del polinomio. Los modos han de formar una base completa ortogonal, lo que garantiza, entre otras cosas, la unicidad de la representación. Los órdenes 30 bajos tienen formas más simples que van siendo más complejas a medida que aumenta el orden. El número de modos aumenta con el orden y en condiciones normales, la magnitud que toman estos modos tiende a decrecer rápidamente con el orden, de manera que casi siempre basta con considerar ordenes no muy altos (hasta 5 o en casos especiales hasta 7 suele ser suficiente).

45 Estas láminas, aunque no están especialmente limitadas a estas descripciones modales, se adaptan especialmente bien a ellas, dado que una lámina diseñada para generar un modo puro, aunque pueda presentar otros modos debido a errores inherentes a la fabricación, éstos no tendrán una influencia significativa en las calibraciones que puedan realizarse para el modo concreto de la lámina.

50 La lámina es de material suficientemente transparente, y se caracteriza porque su espesor cambia de un punto a otro, de forma que cuando un haz de luz la atraviesa, se produce un retardo (desfase) en cada punto dando lugar a una onda aberrante a la salida. La fabricación de estas láminas requiere una alta precisión que generalmente puede alcanzarse con técnicas comunes en microóptica. Entre los posibles métodos, en una invención anterior (número de registro P 200000335, publicada en el B.O.P.I. 1 del 3 de 2003), se propuso el método de fotoescultura en una o varias etapas en un medio fotosensible, por ejemplo fotorresina, depositado sobre un substrato transparente, lo que da lugar a un perfil refractivo que introduce localmente la fase requerida para producir la aberración deseada. Un método alternativo que se está 65 extendiendo y que puede adaptarse perfectamente

a la fabricación de estas láminas, es la ablación láser en materiales orgánicos (plásticos) o vidrios. Este método tiene ventajas sobre todo cuando se requieren formatos grandes, para aperturas superiores al centímetro.

Las principales aplicaciones son por un lado la calibración de aberrómetros, sensores de frente de onda, y sistemas de medida de calidad óptica y de imagen en general; por otro lado la realización de modelos de sistemas ópticos. En ambos casos, la invención se aplica tanto al campo del diseño y fabricación de sistemas ópticos, como, al de la optometría y oftalmología cuando se trata de la óptica ocular.

En cuanto al diseño del conjunto, o juego de láminas, dependerá de la aplicación concreta, pero en general un juego completo constará de 3 subconjuntos, para permitir calibrar la linealidad de los aberrómetros, o permitir simular condiciones suficientemente variadas:

1.- Para garantizar la linealidad entre modos, se incluirá al menos una lámina por cada orden que se vaya a medir o simular.

2.- Para garantizar la linealidad en todo el rango de interés o de medida, se incluirá un grupo de láminas del mismo modo de aberración, pero de distintos valores que cubran el rango de medida.

3.- Para garantizar el funcionamiento con patrones complejos (multimodo) generales, se incluirán láminas que representen situaciones reales típicas de la aplicación concreta.

Generalmente, estos grupos de láminas se utilizarán en bancos de pruebas en los que se dispondrán los sistemas ópticos necesarios para generar un frente de onda que incidirá sobre una o más láminas del conjunto para generar el patrón de aberración deseado. Este banco se adaptará al sistema de medida a calibrar (aberrómetro, sensor de frente de onda, interferómetro, medidor de MTF, PSF o cualquier sistema de test óptico) o al detector, captador de imagen, etc. Todas las láminas de un conjunto o juego completo se fabrican con el mismo diámetro o tamaño, que debe ser igual a la apertura (pupila) máxima que requiera la aplicación. Esto también permite trabajar con aperturas menores, puesto que a partir de la expresión matemática del modo (que suele ser un polinomio), es muy sencillo deducir una expresión para calcular el factor de conversión para aperturas menores [Schwiegerling J., "Scaling Zernike expansion coefficients to different pupil sizes", *J Opt Soc Am A*, vol. 19, p.1937-45, 2002]. De esta forma las láminas pueden ser utilizadas en una mayor variedad de casos, sin más que aplicar esta expresión. También se puede calcular una tabla con los valores del modo para diferentes radios de apertura  $b_{nm}(r_i)$ .

#### Ejemplo de realización de la invención

Como ejemplo de realización se ha elegido un conjunto de láminas de fase como conjunto de calibración para aberrómetros oculares, cada vez más utilizados en las clínicas optométricas y oftalmológicas. Estos dispositivos están diseñados para medir las aberraciones del ojo humano, y el juego de láminas debe adaptarse para ser insertado junto al plano de la pupila de un ojo artificial compuesto por una lente de alta calidad óptica, es decir, libre de aberraciones, un

diafragma y una pantalla donde se proyecta la imagen y que hace el papel de "retina artificial". La colocación de la lámina ha de ser de tal forma que se garantice una precisa alineación. En este caso, las láminas de fase han de adaptarse a la apertura típica, tamaño de pupila, del ojo. Diferentes aberrómetros usan diferentes tamaños de pupila, y a veces los pacientes pueden estar con la pupila dilatada o no. Los cambios en la pupila tienen un efecto muy drástico en el valor de las aberraciones, por lo que en este punto hay que tener especial cuidado.

Para solucionar este problema, las láminas se diseñan para un diámetro de pupila máxima, en este ejemplo concreto ese diámetro es de 6.5 mm. Como casi todas las láminas corresponden a modos puros, se aplican expresiones matemáticas sencillas para calcular los valores que toma la aberración introducida por cada lámina para cada diámetro de pupila. Para mayor comodidad se puede suministrar una tabla con estos valores calculados a partir del valor para la pupila máxima (por ejemplo en intervalos de 1/2 milímetro, hasta el valor máximo de 6.5 mm).

En esta realización se han adoptado los polinomios de Zernike para la descripción modal. Por otro lado, dado que las aberraciones de primer y segundo orden pueden generarse con prismas y lentes oftálmicos, se han considerado modos de ordenes entre 3 y 7. Para el ojo humano normal, las aberraciones más importantes son el coma, trébol (ambas de 3er orden) y la esférica (cuarto orden), por lo que el diseño del conjunto se ha adaptado a estas características. También se incluyen láminas hasta orden 7, dado que estos órdenes más altos sí se dan en ciertas patologías y casos clínicos.

La Figura 1 muestra los modos que se han incluido en el diseño y fabricación de esta realización. Estos modos se muestran en la figura como interferogramas (coseno de la fase). Esto se hace así dado que las láminas son transparentes y por otro lado, lo que interesa es ver la fase (aberración) que producen. El tamaño físico real, como se ha dicho, es de 6.5 mm de diámetro. Cada fila corresponde a los subgrupos mencionados en el apartado anterior. El primer grupo consta de un modo de cada orden, empezando por 3 (aberración de trébol a la izquierda), y acabando en 7 (derecha). Las magnitudes de estos modos oscilan ligeramente, y están entre las 0.3 y las 0.4 micras aproximadamente, algo inferior de la longitud de onda central del espectro visible. En el segundo grupo, que se muestra en la segunda fila, todas las láminas corresponden al mismo modo (coma), pero presentan distintos valores, que van desde 0.11 micras a la izquierda, hasta 0.47 micras a la derecha. Este rango de valores cubre sobradamente el que suele presentarse en ojos reales, incluidos muchos casos clínicos con aberraciones muy superiores a lo normal. Finalmente (abajo en el centro) se incluye una lámina que muestra un patrón (complejo) de aberración de un ojo real. La función de esta lámina es comprobar (o simular) el funcionamiento del sistema que se calibra con ojos reales.

La Figura 2, muestra los interferogramas obtenidos en 3 de las láminas fabricadas correspondientes a órdenes 3, 6 y 7 cuyos interferogramas teóricos se muestran en la Figura 1.

## REIVINDICACIONES

1. Conjunto de láminas de fase **caracterizado** por comprender varias láminas, cada una de ellas que a su vez es un componente óptico transparente cuyo espesor cambia de un punto a otro, de forma que cuando un haz de luz la atraviesa, se produce un retardo (desfase) en cada punto dando lugar a una onda aberrante a la salida, el dicho espesor se calcula para generar un modo o patrón de aberración óptica concreto, y con una magnitud determinada.

2. Conjunto de láminas de fase, según la reivindicación 1, **caracterizado** por comprender al menos una lámina por cada orden de aberración que se vaya a medir o simular.

3. Conjunto de láminas de fase, según la reivindicación 1, **caracterizado** por comprender un grupo de láminas con el mismo modo de aberración, pero con distintas magnitudes, de forma que quede adecuadamente cubierto el rango de medida o de interés.

4. Conjunto de láminas de fase, según la reivindicación 1, **caracterizado** por comprender un grupo de láminas con patrones complejos, multimodo, que representen situaciones reales típicas de la aplicación concreta en la que se utilicen.

5. Conjunto de láminas de fase, según las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado** por comprender cualquier otro grupo de elementos, incluyendo cualquier combinación de las modalidades según reivindicaciones 2, 3 y 4.

6. Procedimiento de generación patrones de aberración **caracterizado** por utilizar una o más del

conjunto de láminas de fase, según reivindicaciones 1 a 5, y que también dispone de los sistemas ópticos necesarios para generar un frente de onda libre de aberración que incidirá sobre una o más láminas del conjunto para generar el patrón de aberración deseado.

7. Uso del procedimiento según reivindicación 6 **caracterizado** por utilizar una o más láminas de fase, y también por disponer de los sistemas ópticos necesarios para utilizar el frente de onda generado por al menos una de las láminas como objeto de medida y calibración de aberrómetros, sensores de frente de onda, y sistemas de medida de calidad óptica, medidores de MTF, PSF y de imagen en general.

8. Uso del procedimiento, según la reivindicación 6, **caracterizado** por la utilización de los sistemas ópticos necesarios para generar un frente de onda que incidirá sobre una o más láminas del conjunto para generar el patrón de aberración deseado para la realización de bancos de simulación óptica, demostradores, prototipos, maquetas a escala, y cualquier otra aplicación.

9. Uso del procedimiento, según la reivindicación 6, **caracterizado** por la utilización del conjunto de láminas en la calibración de instrumentos optométricos y oftálmicos en general y de aberrómetros oculares en particular.

10. Uso del procedimiento, según reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado** por la utilización del conjunto de láminas en la realización de ojos artificiales y modelos oculares a escala, tanto genéricos como personalizados.

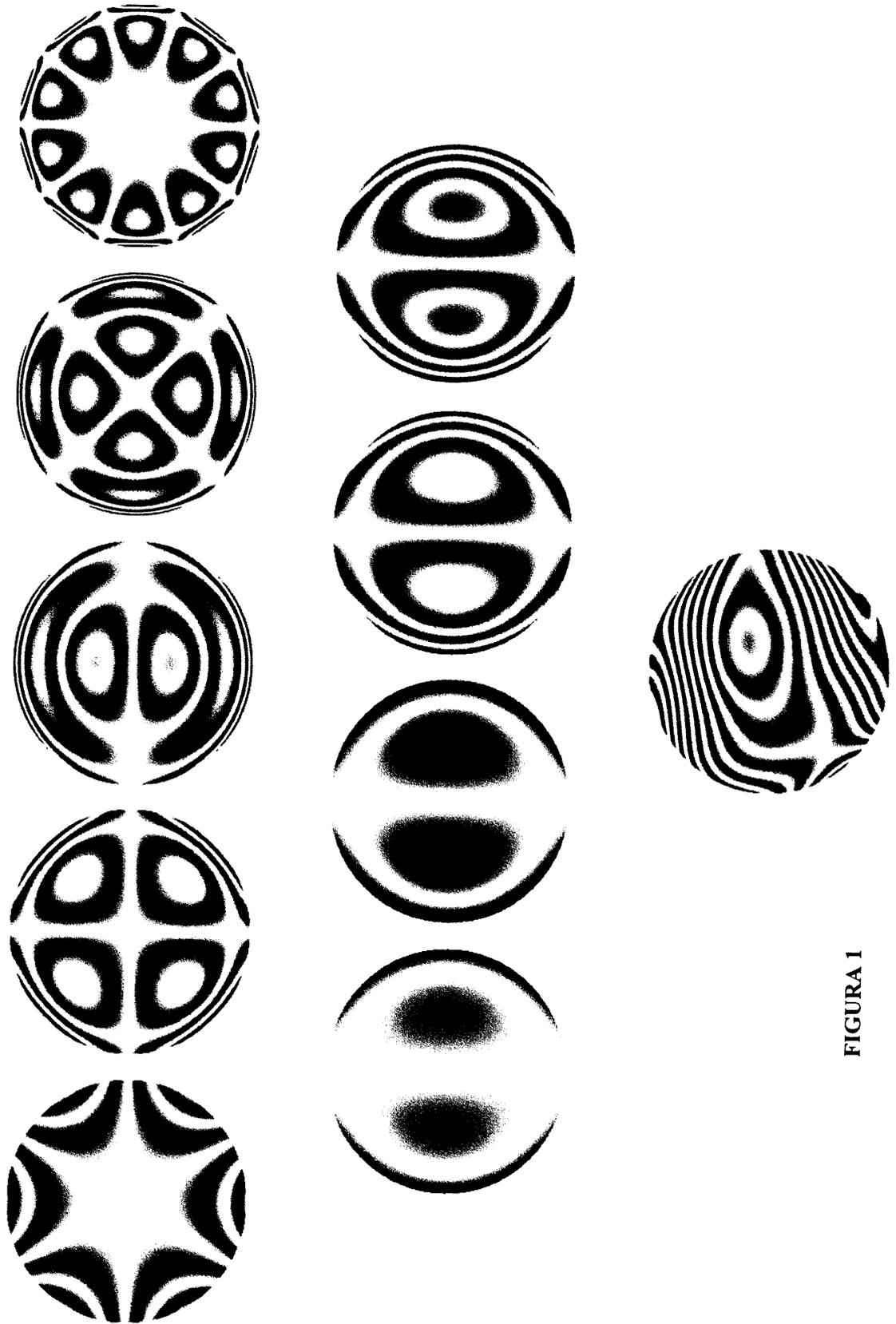


FIGURA 1

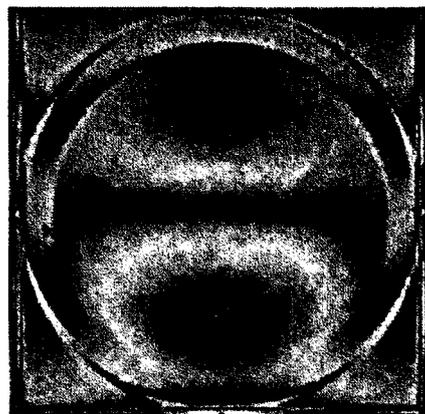
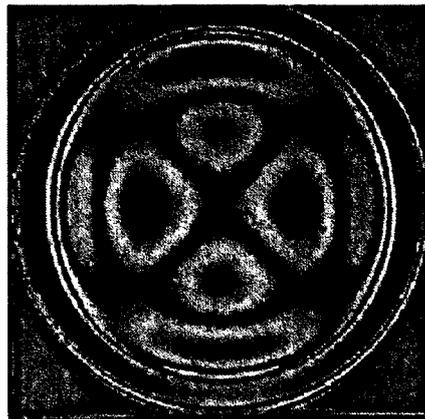
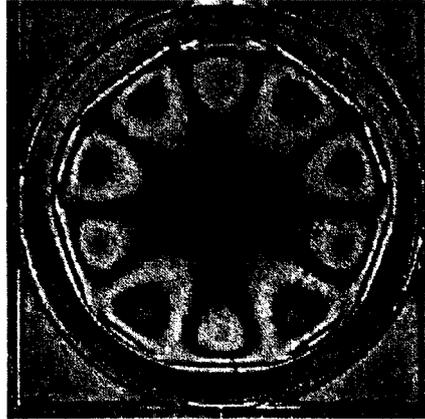


FIGURA 2



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 270 659

② Nº de solicitud: 200401397

③ Fecha de presentación de la solicitud: **09.06.2004**

④ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: **G02B 27/46** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 2003095247 A (NAKAO) 22.05.2003, todo el documento.	1-5
A	NAVARRO, R. et al: "Phase plates for wave-aberration compensation in the human eye". Optics letters, Vol. 25, Nº 4, 15.02.2000, páginas 236-238.	1-6
A	ES 2163369 A1 (UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE COMPOSTELA) 16.01.2002	

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe

22.02.2007

Examinador

A. Navarro Farell

Página

1/1