

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 553 420**

51 Int. Cl.:

**H01L 31/052** (2014.01)

**H01L 31/054** (2014.01)

**F24J 2/08** (2006.01)

**G02B 3/08** (2006.01)

**G02B 3/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.12.2009 E 09796398 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **02.09.2015 EP 2519978**

54 Título: **Concentrador fotovoltaico con lente óptica escalonada y procedimiento para diseñar el mismo**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**09.12.2015**

73 Titular/es:

**PIRELLI & C. S.P.A. (100.0%)  
Viale Piero e Alberto Pirelli, 25  
20126 Milano, IT**

72 Inventor/es:

**GAMBERALE, LUCA y  
GRASSANO, GIUSEPPE**

74 Agente/Representante:

**PONTI SALES, Adelaida**

ES 2 553 420 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Concentrador fotovoltaico con lente óptica escalonada y procedimiento para diseñar el mismo

- 5 **[0001]** La presente invención se refiere a un concentrador solar que comprende una lente óptica que tiene un perfil escalonado para hacer converger la radiación. La invención también se refiere a una lente óptica que tiene un perfil escalonado.
- 10 **[0002]** El desarrollo de las células fotovoltaicas (o solares) para generación de energía eléctrica a menudo ha sido adaptado para proporcionar soluciones rentables. El coste de las células solares generalmente ocupa una parte significativa del coste de los componentes de los módulos de conversión de energía solar. La cantidad de energía eléctrica generada por la célula solar está relacionada directamente con la cantidad de energía solar que absorbe la célula, la cual está basada a su vez en el tamaño o área superficial de la célula y la intensidad o brillo de la luz solar que da en la célula, así como en la eficiencia de conversión de la célula solar. Por lo tanto, aumentar el tamaño de una célula solar puede acabar siendo una manera relativamente cara de aumentar la energía eléctrica producida por la célula.
- 15 **[0003]** Para reducir costes, es deseable aumentar las eficiencias de las células solares en tanto que minimizando el uso de materiales y técnicas de fabricación costosos. Una manera prometedora para conseguir esto es con sistemas concentradores, donde un elemento óptico que cubre un área relativamente grande iluminada por el sol se usa para concentrar enormemente la luz sobre una célula solar relativamente pequeña, reduciendo así enormemente el tamaño de la célula requerida. Con este fin, se han usado lentes Fresnel ya que en general son más delgadas, tienen menor peso y una distancia focal más pequeña que las lentes estándar más gruesas.
- 20 **[0004]** Sin embargo, una limitación importante de los sistemas concentradores es la necesidad de mantener el eje óptico de las lentes normal al sol. El uso de tales concentradores en la práctica requiere un sistema de seguimiento solar que mantenga la óptica de captación alineada con el sol a medida que se desplaza a través del cielo.
- 25 **[0005]** La solicitud de patente de EE.UU. Nº 2005/0092360 desvela un concentrador óptico para una célula solar que emplea un elemento de lente Fresnel montado sobre una célula solar para enfocar la luz solar sobre la superficie de la célula solar cuando el concentrador está alineado con el sol y un elemento concentrador secundario no para formación de imágenes montado intermedio entre la lente Fresnel y la célula solar para redirigir la luz solar procedente de la lente incluyendo los rayos marginales sobre la superficie de la célula solar dentro de la periferia del área activa de la célula cuando el concentrador está desalineado un ángulo predeterminado.
- 30 **[0006]** La solicitud de patente de EE.UU. Nº 2003/0075212 describe un diseño de módulo de conjunto fotovoltaico con una lente Fresnel como primer concentrador óptico y un concentrador parabólico compuesto dispuesto debajo de la lente Fresnel como segundo concentrador óptico.
- 35 **[0007]** Para la concentración de energía solar, se han desarrollado dispositivos ópticos convergentes que usan reflexión interna total (TIR), en los cuales los elementos ópticos convergentes emplean sólo TIR o conjuntamente con refracción.
- 40 **[0008]** La patente de EE.UU. Nº 4.337.759 describe un sistema de redirección de energía radiante que comprende medios de cuerpo de transmisión de energía radiante con elementos que usan sólo reflexión interna total o conjuntamente con refracción.
- 45 **[0009]** La solicitud de patente de EE.UU. Nº 2008/0092879 desvela un dispositivo de concentración o colimación no para formación de imágenes compuesto de dos lentes esféricas. La primera lente tiene una superficie refringente esférica superior y una superficie inferior que consiste en una superficie esférica en su parte central y en una estructura con pendiente discontinua en su parte externa. La segunda lente rodea un receptor y consiste en una superficie refringente esférica.
- 50 **[0010]** La patente de EE.UU. Nº 4.867.514 desvela un sistema óptico para desviar o cambiar la dirección de, y opcionalmente hacer converger la radiación tal como la radiación solar. El sistema tiene un primer plano y un segundo plano, donde el segundo plano es móvil lateralmente con respecto al primer plano. En una realización, los elementos ópticos del segundo plano son lentes negativas de frente de onda interrumpido (Fresnel). Se dice que las aberraciones esféricas se minimizan usando elementos ópticos de curvatura no uniforme.
- 55

**[0011]** En general, se han usado lentes Fresnel desde hace mucho tiempo para muchas aplicaciones aparte de la generación de energía solar.

5 **[0012]** La patente de EE.UU. Nº 3.883.733 se refiere a una lente de advertencia para concentrar la intensidad de una fuente luminosa situada detrás de la lente a lo largo de la línea central de la lente. La lente que proporciona transmisión direccional de la luz que pasa a través es una sección de pared delgada de una carcasa esférica que tiene una pluralidad de lentes convexas cuadradas esféricas colindantes en el lado convexo de la misma. El lado cóncavo tiene una pluralidad de lentes triangulares concéntricas que tienen ciertas dimensiones predeterminadas tal  
10 como se expone en una tabla.

**[0013]** El uso de lentes construidas de material polimérico simplifica la fabricación de las lentes, ya que tales lentes pueden fabricarse fácilmente en producción en masa mediante moldeo, posibilitando así la reducción de costes. Además, emplear lentes poliméricas reduce el peso del elemento óptico resultante.

15 **[0014]** Las lentes Fresnel de tipo general están provistas normalmente de una primera cara y una segunda cara opuesta formada con una serie de estructuras escalonadas que tienen una forma de dientes de sierra en un plano transversal. Se ha observado que la calidad óptica de las lentes Fresnel depende de la forma de dichos dientes, y en particular de las facetas de despulla entre las partes refringentes de dos dientes consecutivos. En las lentes refringentes, las facetas de despulla no realizan funciones ópticas y deberían interferir lo menos posible con el camino de la luz. Idealmente, las facetas de despulla deberían extenderse sustancialmente paralelas a la dirección del haz luminoso transmitido a través de la lente. Sin embargo, el uso de técnicas de moldeo implica limitaciones de diseño para facilitar la extracción de la lente del molde y las facetas de despulla resultantes pueden no presentar un frente pronunciado.

25 **[0015]** La solicitud de patente EP Nº 0117254 desvela una lente Fresnel que comprende una pluralidad de dientes, teniendo cada uno de dichos dientes una parte eficaz para refractar los rayos de luz sobre un foco y una pendiente o flanco de conexión a la parte refringente de un diente adyacente, en el que el ángulo incluido entre dicha parte refringente y dicha pendiente o flanco de conexión es inferior a 90°, y los dientes están dispuestos de tal modo que  
30 siguen un patrón en espiral.

**[0016]** Cuando se selecciona un procedimiento de fabricación para la producción de una lente Fresnel, y en general para una lente con un perfil escalonado, en general han de hacerse varias consideraciones, tales como la fidelidad de reproducción (es decir, la definición de características) y el coste del procedimiento por elemento óptico unitario. Las técnicas de fabricación típicas para producir lentes Fresnel poliméricas son el moldeo por inyección o el moldeo por compresión (a presión atmosférica o en vacío) o el estampado en caliente. El moldeo por compresión puede producir una lente con características agudas, pero tiene un tiempo de ciclo prolongado, lo cual a menudo afecta al coste por pieza. El moldeo por inyección y el estampado en caliente tienen un tiempo de ciclo relativamente corto, pero la fidelidad de reproducción es en general inferior a la obtenida mediante moldeo por compresión.

40 **[0017]** Cuando la definición de características de una lente obtenida mediante moldeo no es aceptable para una aplicación particular, puede usarse acabado superficial mediante el uso de herramientas de corte, como mediante conformado con una herramienta de diamante. Sin embargo, el micromecanizado de precisión aumenta significativamente los costes de fabricación, y por lo tanto puede no ser deseable para producción de lentes a gran escala, por ejemplo para usarse en concentradores solares.

**[0018]** En el documento "Plastics Structured Optics for Solar Concentrators in PV System" de C. Privato y col., publicado en las actas de la International Solar Concentration Conference for the Generation of Electricity and Hydrogen (TCSC-3), 1-5 de mayo de 2005, Scottsdale, Arizona, EE.UU., se han investigado algunos parámetros  
50 críticos del procedimiento de fabricación con el fin de mejorar la relación de aspecto y la calidad óptica de las lentes escalonadas moldeadas.

**[0019]** La presente invención comprende una lente óptica escalonada que tiene una superficie delantera y una superficie trasera, en la que la superficie trasera comprende una pluralidad de estructuras escalonadas, estando  
55 formada cada estructura escalonada por una faceta en pendiente y una faceta de despulla, teniendo las facetas en pendiente y de despulla inclinaciones diferentes.

**[0020]** Los inventores se han dado cuenta de que si se impide que la radiación que incide sobre la lente dé en las partes de la superficie trasera que corresponde a las regiones no ópticas de las estructuras escalonadas, la

eficiencia óptica de la lente no se verá afectada por la forma de las regiones no ópticas, por ejemplo la no verticalidad de las facetas de despulla y/o la redondez de las estructuras escalonadas, y de este modo por la posible falta de definición de tales regiones.

5 **[0021]** Los inventores han comprendido que proporcionando una lente concentradora que comprende una superficie trasera con un perfil escalonado con una superficie delantera que está configurada para "prefocalizar" la radiación incidente principalmente sólo sobre las partes de la superficie trasera que contribuyen a la convergencia de la radiación, la eficiencia óptica de la lente aumenta significativamente. Han descubierto que proveyendo a la superficie delantera de una lente escalonada refringente de una pluralidad de elementos lenticulares convergentes,  
10 estando situado cada elemento opuesto a una estructura escalonada respectiva, es posible hacer converger la radiación incidente sustancialmente sobre las facetas en pendiente de las estructuras escalonadas.

**[0022]** Los inventores han descubierto que la solución técnica según un primer aspecto de la invención también es adecuada para una lente óptica escalonada que usa reflexión interna total (TIR), sola o en combinación con refracción. Específicamente, empleando prefocalización sobre la superficie delantera de la lente, los rayos incidentes  
15 pueden salir de la superficie trasera en una región dentro de una faceta de despulla que no incluye la cresta y el valle de la faceta, minimizando así los efectos de la posible redondez.

**[0023]** La presente invención está definida por los términos de las reivindicaciones adjuntas. Según un aspecto y en términos generales, la presente invención está dirigida a un concentrador solar que comprende al menos una célula solar que comprende una superficie delantera, y un sistema óptico que concentra la radiación solar hacia la célula solar. El sistema comprende una lente óptica escalonada que tiene una superficie delantera para recibir la radiación solar y una superficie trasera opuesta enfrentada a la superficie delantera de la célula solar. La superficie trasera tiene un perfil escalonado que define una pluralidad de estructuras escalonadas, cada estructura escalonada,  
25 en un plano transversal de la lente, tiene una forma de dientes de sierra y está formada por una faceta en pendiente y una faceta de despulla, teniendo las facetas en pendiente y de despulla inclinaciones diferentes, estando cada estructura escalonada caracterizada por un paso (P). La faceta en pendiente se extiende por una primera longitud en el plano transversal y la faceta de despulla se extiende por una segunda longitud en el plano transversal. La superficie delantera de la lente comprende una pluralidad de elementos convergentes lenticulares contiguos,  
30 teniendo cada elemento lenticular un primer y un segundo borde periférico y una anchura ( $w_L$ ) que se extiende entre el primer y el segundo bordes periféricos. Cada elemento lenticular está situado opuesto a una estructura escalonada correspondiente y está configurado de manera que un primer rayo incidente sobre el primer borde del elemento lenticular a lo largo de una primera dirección incidente que está situada en el plano transversal pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir sobre la faceta en pendiente de la estructura escalonada respectiva en un primer punto de interceptación, y un segundo rayo paralelo al primer rayo e incidente sobre el  
35 segundo borde del elemento lenticular pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir sobre la faceta en pendiente de la estructura escalonada correspondiente en un segundo punto de interceptación. La parte en pendiente en el plano transversal comprendida entre el primer y el segundo puntos de interceptación dentro de la faceta en pendiente se extiende dentro de la primera longitud y define una región de focalización de la estructura  
40 escalonada.

**[0024]** En algunas realizaciones preferentes de la invención, las estructuras escalonadas son refringentes, en las que el primer y el segundo rayo son refractados por la faceta en pendiente en el primer y el segundo puntos de interceptación respectivos y salen de la lente para converger hacia una zona focal.  
45

**[0025]** Una pluralidad de zonas focales de radiación incidente en la pluralidad respectiva de estructuras escalonadas forman, en algunas realizaciones, una región focal en la superficie delantera de la célula solar.

**[0026]** Con preferencia, la pluralidad de estructuras escalonadas están dispuestas transversalmente adyacentes  
50 en un plano de incidencia perpendicular a la primera dirección.

**[0027]** Con preferencia, los bordes periféricos de la pluralidad de elementos lenticulares están situados en un plano de incidencia perpendicular a la primera dirección.

55 **[0028]** Las realizaciones preferentes de la invención, cada elemento lenticular tiene una superficie curvada en el plano transversal. Los elementos lenticulares son convexos hacia el exterior.

**[0029]** Con preferencia, cada estructura escalonada tiene un paso comprendido entre 0,1 mm y 10 mm.

**[0030]** Cada elemento lenticular tiene una anchura igual a un paso de la estructura escalonada correspondiente.

**[0031]** En algunas realizaciones, cada estructura escalonada está caracterizada por un paso y cada elemento lenticular tiene un perfil de arco circular en el plano transversal con un radio igual a al menos tres veces el paso de la estructura escalonada correspondiente.

**[0032]** El número de la pluralidad de elementos lenticulares corresponde al número de la pluralidad de estructuras escalonadas.

10 **[0033]** En algunas realizaciones, los elementos lenticulares tienen una relación de aspecto comprendida entre 0,005 y 0,05.

**[0034]** Con preferencia, la sección de lente en el plano transversal que corresponde a una estructura escalonada de la pluralidad tiene un grosor máximo y cada elemento lenticular de la sección de lente tiene una distancia focal en la primera dirección incidente más grande que el grosor máximo.

**[0035]** Según algunas realizaciones, en el concentrador solar, un tercer rayo incidente a lo largo de una segunda dirección incidente sobre el primer borde de cada elemento lenticular de la lente óptica escalonada en un primer ángulo de desviación con respecto a las primeras direcciones incidentes pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir sobre la faceta en pendiente de la estructura escalonada respectiva en un tercer punto de interceptación, y un cuarto rayo a lo largo de una tercera dirección incidente en un segundo ángulo de desviación con respecto a la primera dirección incidente e incidente sobre el segundo borde del elemento lenticular pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir sobre la faceta en pendiente de la estructura escalonada correspondiente en un cuarto punto de interceptación. La parte de la faceta en pendiente en el plano transversal se extiende dentro de la faceta en pendiente entre el tercer y el cuarto puntos de interceptación y define una región de focalización ampliada de la estructura escalonada que comprende la región de focalización. Con preferencia, el primer y el segundo ángulo de desviación son iguales.

**[0036]** En algunas realizaciones preferentes de la invención, la lente escalonada comprendida en el concentrador solar es una lente Fresnel con simetría axial y las estructuras escalonadas tienen una forma anular en el plano. Con preferencia, la lente tiene un eje óptico paralelo a la primera dirección incidente.

**[0037]** En algunas realizaciones, la lente óptica escalonada del concentrador solar incluye una pluralidad de estructuras escalonadas en la cual al menos una primera subpluralidad de la pluralidad de estructuras escalonadas usan reflexión interna total. Cada estructura escalonada de la primera subpluralidad comprende una faceta en pendiente reflectante y la faceta de despulla recibe el primer y el segundo rayo refractados por la superficie delantera de la lente y reflejados por la faceta en pendiente desde el primer y segundo puntos de interceptación respectivos en el quinto y sexto puntos de interceptación respectivos de la faceta de despulla. La parte de faceta de despulla que se extiende entre el quinto y sexto punto de interceptación se extiende dentro de la segunda longitud.

**[0038]** En algunas realizaciones la lente óptica escalonada del concentrador solar es una lente híbrida en la cual la pluralidad de estructuras escalonadas comprende una primera subpluralidad que usa reflexión interna total y una segunda subpluralidad de estructuras escalonadas que usan refracción, en la que cada estructura de la segunda pluralidad comprende una faceta en pendiente refringente y en la que el primer y el segundo rayo incidente que dan en la faceta en pendiente refringente de una estructura escalonada de la segunda subpluralidad en el primer y el segundo punto de interceptación respectivo de la faceta en pendiente son refractados para salir de la lente. Con preferencia, la primera subpluralidad de estructuras escalonadas está dispuesta periféricamente de la segunda subpluralidad.

50 **[0039]** Con preferencia, el sistema óptico comprendido en el concentrador solar comprende además un elemento óptico secundario dispuesto entre la lente óptica escalonada y la célula solar a lo largo de la primera dirección incidente para recibir la radiación redirigida por la lente.

**[0040]** En algunas realizaciones, en la lente escalonada comprendida en el concentrador, la faceta en pendiente y la faceta de despulla de cada estructura escalonada están unidas por una parte de cresta que tiene un perfil curvado.

**[0041]** En algunas realizaciones, en la lente escalonada comprendida en el concentrador, la faceta de despulla de una primera estructura escalonada está unida a una faceta en pendiente de una segunda estructura escalonada

adyacente siguiente por una parte de valle que tiene un perfil escalonado.

**[0042]** En otro aspecto, la presente invención está dirigida a una lente óptica escalonada que comprende una superficie delantera para recibir una radiación incidente, y una superficie trasera opuesta que comprende un perfil escalonado que define una pluralidad de estructuras escalonadas. Cada estructura escalonada tiene una forma de dientes de sierra en un plano transversal de la lente y está formada por una faceta en pendiente y una faceta de despulla, teniendo las facetas en pendiente y de despulla inclinaciones diferentes. La faceta en pendiente se extiende por una primera longitud en el plano transversal y la faceta de despulla se extiende por una segunda longitud en el plano transversal. La superficie delantera de la lente comprende una pluralidad de elementos convergentes lenticulares, teniendo cada elemento lenticular un primer y un segundo borde periférico. Cada elemento lenticular está situado opuesto a una estructura escalonada correspondiente y está configurado de manera que un primer rayo incidente sobre el primer borde del elemento lenticular a lo largo de una primera dirección incidente que está situada en el plano transversal pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir sobre la faceta en pendiente de la estructura escalonada respectiva en un primer punto de interceptación, y un segundo rayo paralelo al primer rayo e incidente sobre el segundo borde del elemento lenticular pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir sobre la faceta en pendiente de la estructura escalonada correspondiente en un segundo punto de interceptación. La parte en pendiente en el plano trasversal comprendida entre el primer y el segundo puntos de interceptación dentro de la faceta en pendiente se extiende dentro de la primera longitud y define una región de focalización de la estructura escalonada.

**[0043]** Al no tener contribución de las partes no agudas, pueden emplearse técnicas de fabricación de coste relativamente bajo para la producción de la lente escalonada.

**[0044]** Con preferencia, en la lente óptica escalonada, la pluralidad de estructuras escalonadas están dispuestas transversalmente adyacentes en un plano de incidencia perpendicular a la primera dirección.

**[0045]** Con preferencia, los bordes periféricos de la pluralidad de elementos lenticulares están situadas en un plano de incidencia perpendicular a la primera dirección.

**[0046]** En algunas realizaciones, la lente escalonada es una lente Fresnel en la cual las estructuras escalonadas son concéntricas y anulares cuando se ven en un plano de incidencia perpendicular a la primera dirección.

**[0047]** En otras realizaciones, la lente escalonada es una lente prismática en la cual las estructuras escalonadas están dispuestas secuencialmente de manera sustancialmente paralelas entre sí cuando se ve en un plano de incidencia perpendicular a la primera dirección.

**[0048]** En realizaciones adicionales, la faceta en pendiente y la faceta de despulla de cada estructura escalonada están unidas por una parte de cresta que tiene un perfil curvado. En una realización, el perfil curvado de la parte de cresta tiene un radio de curvatura de 5 a 100  $\mu\text{m}$ .

**[0049]** En otras realizaciones, la faceta de despulla de una primera estructura escalonada está unida a una faceta en pendiente de una segunda estructura escalonada adyacente siguiente por una parte de valle que tiene un perfil curvado. En una realización, el perfil curvado de la parte de valle tiene un radio de curvatura de 5 a 100  $\mu\text{m}$ .

**[0050]** Con preferencia, la profundidad máxima de una estructura escalonada, definida como la diferencia de longitud transversal entre el grosor máximo y el grosor mínimo de la lente, no es mayor de 1,5 mm, con más preferencia no mayor de aproximadamente 1 mm.

**[0051]** Dentro de esta descripción y las reivindicaciones adjuntas, con lente óptica escalonada se quiere decir una lente óptica que comprende una superficie que tiene un perfil escalonado que defina una pluralidad de estructuras escalonadas, en particular que tiene una forma de dientes de sierra en un plano transversal. Dentro de la presente descripción y las reivindicaciones adjuntas, una forma de dientes de sierra se refiere tanto a una estructura escalonada con un perfil pronunciado ideal, como a una estructura con cresta y/o valle redondeados.

**[0052]** A continuación se describirá más pormenorizadamente la presente invención en lo sucesivo con referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales se muestran algunas, pero no todas las realizaciones de la invención. Los dibujos que ilustran las realizaciones no son representaciones esquemáticas a escala.

La fig. 1 ilustra esquemáticamente una sección transversal de una lente Fresnel convencional.

La fig. 2 es una parte a escala ampliada E de la vista en corte transversal de la fig. 1.

La fig. 3 compara un perfil escalonado ejemplar de una lente Fresnel "ideal" con el de una lente moldeada que tiene estructuras escalonadas redondeadas.

5

La fig. 4 es una vista esquemática en corte transversal de una lente Fresnel refringente según una realización de la presente invención.

La fig. 5 es una parte a escala ampliada G de la vista en corte transversal de la fig. 4.

10

La fig. 6 muestra la misma parte de lente de la fig. 5, que indica además los caminos de los rayos de luz incidentes a través de la lente.

La fig. 7 informa sobre un ejemplo de un perfil de lente simulado para una lente refringente Fresnel de acuerdo con la presente invención.

15

La fig. 8 muestra esquemáticamente dos elementos lenticulares ejemplares de la superficie delantera de una lente, según una realización de la presente invención.

20 La fig. 9a es una vista en planta desde arriba de un módulo fotovoltaico de concentración solar, que muestra un conjunto de lentes Fresnel como lentes primarias, según una realización de la presente invención.

La fig. 9b es una vista esquemática en corte transversal tomada a lo largo de la línea CC de la fig. 9a y que muestra una unidad de módulo que comprende una lente Fresnel según una realización de la invención.

25

La fig. 10 ejemplifica el posible camino óptico de un rayo incidente desviado de la normal en una lente escalonada, la cual puede ser, por ejemplo, una lente Fresnel convencional (sólo se muestran dos estructuras escalonadas).

La fig. 11 es una vista esquemática en corte transversal que muestra una sección de lente que corresponde a una única estructura escalonada para ejemplificar la refracción de la radiación perpendicular al plano de incidencia y de la radiación que tiene un ángulo de desviación  $\alpha$  respecto a la dirección perpendicular.

30

La fig. 12 informa de los resultados para un perfil de lente simulado para una lente refringente Fresnel y los rayos de luz que inciden con un ángulo de desviación de  $2^\circ$ , en una realización de la presente invención. Sólo se ilustra una parte ejemplar de la lente.

35

La fig. 13 es una vista en perspectiva de una lente prismática según una realización de la invención.

La fig. 14 muestra un perfil de lente simulado ejemplar para una lente prismática con un foco de un solo punto.

40

La fig. 15 muestra una parte de una lente escalonada que comprende una pluralidad de estructuras escalonadas TIR espaciadas transversalmente, según una realización de la presente invención.

La fig. 16 es una vista esquemática en corte transversal de una lente escalonada híbrida, según una realización de la presente invención.

45

La fig. 17 ilustra las convenciones de símbolos y ángulos del camino óptico de un rayo dentro y fuera de una sección de lente usada en las ecuaciones del apéndice A.

50 **[0053]** La figura 1 ilustra esquemáticamente una sección transversal de una lente Fresnel convencional ejemplar 1 con simetría axial con respecto a un eje óptico 6, que está situado en un plano transversal (x, z) a lo largo del eje z. La lente Fresnel tiene una superficie delantera lisa 2 y una superficie trasera 3 con un perfil escalonado que define una pluralidad de estructuras escalonadas 5 dispuestas concéntricamente alrededor de una parte central 4, teniendo ésta, por ejemplo, una forma lenticular con perímetro circular. La parte central 4 es típicamente la parte a través de la cual pasa el eje óptico 6. En la lente Fresnel ejemplar mostrada en la figura, la superficie delantera 2 es plana y el perfil escalonado de la superficie trasera 3 es convexo con respecto al plano definido por la superficie delantera. La superficie delantera 2 es sustancialmente perpendicular al eje óptico 6.

55

**[0054]** En los diseños comunes de las lentes Fresnel, cerca del centro de la lente, las facetas en pendiente de las

estructuras escalonadas 5 son casi paralelas a la superficie delantera, mientras que gradualmente se vuelven más pronunciadas hacia los bordes de la lente. El ángulo de pendiente,  $\theta_i$ , (no indicado en las figs. 1-2) formado por la faceta en pendiente de la estructura escalonada  $i$ -ésima ( $i=1, 2, \dots, n$ ) con un plano de incidencia perpendicular al eje óptico 6, el cual es en este caso un plano paralelo a la superficie delantera, puede seleccionarse de manera que los rayos del sol que inciden en la lente son redirigidos por la superficie en pendiente a una parte predeterminada de una superficie objetivo (por ejemplo, la superficie de una célula solar que recibe la luz) en un plano focal común situado a una distancia focal,  $F_0$ . Dicha parte de la superficie objetivo se denominará la región focal. El ángulo de pendiente de cada estructura seleccionada puede seleccionarse para que defina una sola distancia focal. Alternativamente, la lente Fresnel puede estar estructurada para que sea de un tipo multifocal, por ejemplo cuando interesa la uniformidad de iluminación dentro de una zona dada o cuando la luz ha de ser redirigida hacia un elemento óptico adicional.

**[0055]** En aplicaciones típicas de lentes Fresnel en concentradores fotovoltaicos, la orientación de la superficie escalonada es hacia la célula solar (ranuras "dentro") debido a la ventaja potencial de evitar la acumulación de suciedad y residuos dentro de las facetas. Aunque el tamaño de las estructuras escalonadas puede variar dependiendo de varios factores, tales como el grosor máximo deseado de la lente, la dimensión de la región focal en la célula y/o el factor concentrador, y/o la distancia desde el centro de la lente, el paso típico de las estructuras puede estar comprendido entre aproximadamente 0,1 y 10 mm.

**[0056]** La figura 2 muestra una parte a escala ampliada E de la lente Fresnel de la fig. 1 en la cual se ilustran unas pocas estructuras escalonadas adyacentes siguientes ejemplares 5a, 5b y 5c definidas por la superficie escalonada. Para cada estructura escalonada, la forma transversal de la superficie trasera comprende una faceta en pendiente 9, cuya inclinación, concretamente el ángulo de pendiente, con respecto a un plano paralelo a la superficie delantera, y en general perpendicular a la radiación incidente, puede variar de una estructura escalonada a la siguiente estructura escalonada adyacente, y una faceta de despulla más pronunciada 8 que conecta las facetas en pendiente de dos estructuras adyacentes siguientes. Cuando se ve como una sección de lente, siempre en un plano transversal (x, z), la parte de la lente Fresnel que corresponde a una sola estructura escalonada tiene una forma de dientes de sierra. Las facetas en pendiente contribuyen a la refracción de la radiación solar incidente sobre la superficie delantera, mientras que las facetas de despulla tienen la función de interconectar dos facetas en pendiente adyacentes siguientes. Idealmente, las facetas de despulla son sustancialmente paralelas a la dirección de incidencia de los rayos de luz sobre la lente de manera que interfieren lo menos posible con el camino óptico de los rayos. Como los concentradores fotovoltaicos típicamente hacen uso de un sistema de seguimiento para mantener la dirección de incidencia de la radiación solar para que sea perpendicular o casi perpendicular a la superficie delantera de la lente, teóricamente, la provisión de facetas de despulla sustancialmente perpendiculares a la superficie delantera, y que forman así vértices y valles agudos con las facetas en pendiente contiguas, minimiza las pérdidas ópticas.

**[0057]** En realidad, la fabricación mediante moldeo requiere generalmente que las facetas de despulla estén desviadas de la norma unos pocos grados de inclinación, por ejemplo 1-2° para lentes refringentes, para facilitar el desmoldeo.

**[0058]** Además, el uso de procedimientos de fabricación de coste relativamente bajo, tales como moldeo por inyección, será a costa de una pérdida en la fidelidad de reproducción de las características de la superficie trasera.

**[0059]** La figura 3 es una vista esquemática en corte transversal de una parte de una lente Fresnel en la cual el perfil escalonado de una lente Fresnel "ideal" (línea continua) se compara con un perfil escalonado "renal" ejemplar (línea de puntos) de una lente moldeada, la cual puede obtenerse mediante moldeo en la cual las características agudas no son reproducidas. En el perfil escalonado "ideal" 10, la faceta en pendiente 9 y la faceta de despulla 8 de cada estructura escalonada define un vértice agudo 12 y la faceta de despulla define un valle agudo 13 con la faceta en pendiente de una estructura escalonada adyacente siguiente. En el perfil escalonado "real" 11, los vértices y valles agudos han sido redondeados en crestas y valles unidos por una faceta de despulla que está desviada de la normal con respecto a la superficie delantera 14, o fuera del eje respecto a la dirección de la dirección incidente, la cual se supone que es a lo largo del eje z, como se ejemplifica por la flecha 15. En general, la redondez de las crestas y valles depende del procedimiento de moldeo, del material que es moldeado y de las dimensiones de las estructuras escalonadas.

**[0060]** La presencia de facetas de despulla no paralelas a la radiación incidente y de ángulos redondeados reduce significativamente la parte de las facetas en pendiente de las estructuras escalonadas útiles para la refracción óptica de los rayos que surgen de la superficie trasera de la lente con una dirección convergente a un área objetivo del

plano focal, disminuyendo así significativamente la eficiencia de captación de la lente en aplicaciones fotovoltaicas.

**[0061]** En un plano transversal ( $x,z$ ), la lente puede dividirse en regiones de "focalización" A que comprenden la parte de las facetas en pendiente "útil" para la refracción de la radiación sobre una zona focal y regiones de interconexión B, las cuales comprenden las facetas de despulla y las crestas y valles redondeados. Las regiones de focalización A están separadas por las regiones de interconexión B (las líneas de separación están indicadas con líneas de puntos y rayas). La relación entre la anchura de las regiones de interconexión B y la anchura de las regiones de focalización A puede tomarse como un parámetro que define la calidad de la lente, dependiendo el parámetro de varios factores, tales como los ángulos de pendiente de las estructuras escalonadas, los ángulos de despulla definidos entre las faceta de despulla y un eje paralelo a la radiación incidente, y el espacio, P, entre dos valles adyacentes siguientes 13, denominado en lo sucesivo el paso de la estructura escalonada. En general, para un área superficial total dada de una lente escalonada, cuanto mayor es el número de estructuras escalonadas, y por lo tanto cuanto menor es el paso, más relevante es la contribución a las pérdidas de las regiones de interconexión.

**[0062]** En un perfil redondeado "real" de las estructuras escalonadas, la redondez o curvatura puede representarse mediante un primer radio de curvatura, R1, entre las facetas dentro de una estructura escalonada y un segundo radio de curvatura, R2, formado por el valle redondeado entre dos estructuras escalonadas adyacentes siguientes. En el ejemplo mostrado en la fig. 3, la redondez de las crestas y los valles del perfil de lente se supone que está descrita por una circunferencia, concretamente el primer radio de curvatura es el radio de una circunferencia tangente a las facetas en pendiente y de despulla de una estructura escalonada y el segundo radio de curvatura es el radio de una circunferencia tangente a la faceta de despulla de una estructura escalonada y a la faceta en pendiente de una estructura escalonada adyacente siguiente (las circunferencias están indicadas con líneas de rayas). Por ejemplo, para una lente Fresnel construida de metacrilato de polimetilo (PMMA) y obtenida mediante moldeo por inyección, los radios de curvaturas R1 y R2 de la cresta y el valle redondeados, respectivamente, pueden estar comprendidos entre 20  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ . Ha de entenderse que las crestas y los valles de estructuras escalonadas en las lentes poliméricas moldeadas pueden tener una redondez caracterizada por una pluralidad de radios de curvatura y en general no estar definidos por una circunferencia. En las lentes Fresnel obtenidas mediante otros procedimientos de moldeo, tales como moldeo por compresión, la redondez de los bordes del perfil escalonado puede estar caracterizada por radios de curvatura inferiores, por ejemplo del orden de unos pocos micrómetros, sin embargo, generalmente a costa de un aumento significativo del coste por pieza con respecto a las lentes construidas mediante moldeo por inyección. Debido a la difusión de la luz en los bordes redondeados que causa dispersión de la radiación en direcciones diferentes a las de la región focal, para la cual está diseñada la lente, el rendimiento óptico de una lente se degrada.

**[0063]** Los inventores han descubierto que proporcionando a la superficie delantera una pluralidad de elementos lenticulares convergentes dispuestos de tal manera que hacen converger la radiación incidente básicamente sólo en las regiones de focalización de la lente A, es posible mantener la radiación incidente fuera de las regiones de interconexión B y, por lo tanto, al menos reducir significativamente las pérdidas ópticas.

**[0064]** La figura 4 ilustra una vista en corte transversal de una lente Fresnel refringente según una realización de la presente invención. Una lente Fresnel 20 comprende una superficie delantera 21 y una superficie trasera opuesta 22, tal como se ve desde un plano transversal ( $x,z$ ) que incluye un eje óptico de la lente 27. La lente Fresnel de la presente realización es simétrica con respecto al eje óptico. La superficie trasera 22 comprende una parte central 26, la cual puede tener una superficie plana o ser convexa hacia el exterior, y una pluralidad de estructuras escalonadas 24 dispuestas concéntricamente alrededor de la parte central 26, concretamente alrededor del eje óptico 27. Cada estructura escalonada 24 tiene una forma de dientes de sierra en el plano transversal ( $x,z$ ) y está formada por una faceta en pendiente 29 y una faceta de despulla 28, teniendo las facetas en pendiente y de despulla inclinaciones diferentes.

**[0065]** La superficie delantera 21 está estructurada para que comprenda una pluralidad de elementos lenticulares ópticamente convergentes 23, estando dispuesto cada elemento lenticular para corresponder, en un plano transversal de la lente, a una estructura escalonada respectiva 24 y estando configurado para hacer converger sustancialmente la luz incidente perpendicular al plano incidente en una región de focalización dentro de la faceta en pendiente de la estructura escalonada respectiva.

**[0066]** La superficie delantera está estructurada para prefocalizar los haces luminosos que inciden perpendicularmente sobre la lente, refractando la luz que entraría en la lente en las regiones de interconexión B y dirigiéndola en las regiones de la lente A que tienen un perfil en pendiente que contribuyen a la convergencia de la

radiación.

**[0067]** Un plano de incidencia está definido perpendicularmente a la radiación incidente, es decir, el eje z en la fig. 4. Para las lentes ópticas "planas", en las que los extremos de los elementos lenticulares están situados sustancialmente en un plano común, el plano de incidencia atraviesa sustancialmente toda la lente a lo largo del eje x.

**[0068]** La figura 5 muestra una parte a escala ampliada G de la vista en corte transversal de la fig. 4, en la cual se muestran dos elementos lenticulares 23a y 23b con estructuras escalonadas respectivas 24a y 24b. En las realizaciones preferentes de la invención, cada elemento lenticular convergente del perfil de la superficie delantera, tal como el elemento lenticular 23b, tiene una superficie que es convexa hacia el exterior con un primer borde periférico 34b y un segundo borde periférico 34c. Cada elemento lenticular actúa como un elemento óptico convergente, que es más grueso en su centro mientras que disminuye de grosor hacia sus bordes periféricos, cuando se ve en un plano transversal (x,z). Un borde periférico de un elemento lenticular se define como el borde de las partes convexas del elemento lenticular. En muchos casos de interés, en los bordes periféricos, el grosor del elemento lenticular está en su mínimo.

**[0069]** En algunas realizaciones, los rayos perpendiculares incidentes en un elemento lenticular son convergentes hacia un punto o región focal "virtual", FL (indicado en la fig. 5 sólo para el elemento 23a), cuya distancia desde la superficie delantera, a lo largo del eje z, depende del índice de refracción de la lente y de la relación de aspecto del elemento lenticular, por ejemplo, del radio del elemento lenticular, en caso de un elemento lenticular circular. Con preferencia, el foco, FL, de un elemento lenticular está ubicado a una distancia focal que es mayor que el grosor máximo,  $s_{max}$ , de la sección de lente que corresponde a la estructura escalonada opuesta al elemento lenticular. La figura 5 también indica el grosor mínimo,  $s_{min}$ , de la sección de lente que corresponde a una estructura escalonada, el ángulo de pendiente,  $\vartheta$ , formado por cada punto de la faceta en pendiente con el plano de incidencia y el ángulo de despulla,  $\zeta$ , formado por la faceta de despulla con la dirección de incidencia.

**[0070]** Todos los elementos lenticulares pueden tener una forma superficial igual, por ejemplo, circular, aunque esto no debería considerarse limitativo de la presente invención.

**[0071]** Una anchura,  $w_L$ , de cada elemento lenticular de la pluralidad puede estar definida en el plano transversal (x,z) a lo largo del eje x, extendiéndose la anchura entre los dos bordes periféricos 34b y 34c. En una primera aproximación, la anchura  $w_L$  corresponde al paso, P, concretamente la distancia, siempre a lo largo del eje x, entre dos valles subsiguientes (adyacentes siguientes) de la estructura escalonada correspondiente opuesta.

**[0072]** Cada elemento lenticular puede estar caracterizado por su relación de aspecto, la cual se define por la relación de la altura máxima, H, del elemento tomada en un plano transversal, por ejemplo (x,z), a la anchura,  $w_L$ , en la que la altura máxima corresponde al grosor máximo del elemento lenticular. En algunas realizaciones preferentes de la invención, la pluralidad de estructuras escalonadas tienen un paso comprendido entre 0,1 mm y 10 mm. La relación de aspecto de los elementos lenticulares puede abarcar hasta 0,05, con preferencia desde 0,005 hasta 0,05.

**[0073]** En algunas realizaciones preferentes de la invención, la lente escalonada comprende una pluralidad de estructuras escalonadas que tienen un paso variable a través de la pluralidad de estructuras. Por ejemplo, en las lentes Fresnel o prismáticas, la inclinación media de las facetas en pendiente, y/o el paso, puede estar dispuesta para variar de una estructura escalonada a la siguiente.

**[0074]** En una realización preferente de la invención, la lente tiene una simetría axial y el paso disminuye desde el centro de la lente hacia la periferia de la lente.

**[0075]** En algunas realizaciones preferentes de la invención, la lente comprende una pluralidad de estructuras escalonadas espaciadas transversalmente en el plano de incidencia desde un eje de referencia perpendicular al plano de incidencia, teniendo cada par de estructuras escalonadas adyacentes consecutivas una primera estructura escalonada dispuesta periféricamente a una segunda estructura escalonada con respecto al eje de referencia, teniendo la primera estructura escalonada un paso mayor que la segunda estructura escalonada. En una realización, la lente es simétrica y el eje de referencia es el eje óptico que pasa a través del centro de la lente.

**[0076]** Volviendo a hacer referencia a la fig. 4, con preferencia, los elementos lenticulares son contiguos en un plano principal de la superficie delantera 21 perpendicular al eje óptico 27 de manera que dos elementos lenticulares

adyacentes siguientes tienen un borde periférico en común, el menos en las secciones de la lente provistas de las estructuras escalonadas. En correspondencia con la parte central 26 de la superficie trasera, la superficie delantera 21 puede comprender un elemento lenticular 25 de manera que una pluralidad de elementos lenticulares contiguos están provistos a través de la superficie delantera. Alternativamente, puede estar provista una región plana en correspondencia con la parte central 26 de la superficie trasera (realizaciones no mostradas en la figura). En una realización, la parte central 26 de la superficie trasera comprende una estructura escalonada. Ha de observarse que en muchas configuraciones típicas para concentraciones fotovoltaicas, el número de estructuras escalonadas en una lente Fresnel puede ser de 100 a pocos cientos de manera que la parte central constituye sólo una fracción muy pequeña del área de la superficie trasera de la lente. Por lo tanto, en muchos casos de interés, la forma de la parte central no es relevante para el rendimiento óptico de la lente.

**[0077]** Con preferencia, para una lente Fresnel, cada estructura escalonada y cada elemento lenticular correspondiente son anulares en un plano incidente, de manera que el primer y segundo bordes periféricos son circunferenciales. Con el segundo borde periférico rodeando el primer borde periférico, definiendo así una región anular que corresponde sustancialmente a la región anular en el plano de la estructura escalonada respectiva. En general, el contorno definido por los bordes de los elementos lenticulares en el plano de incidencia (por ejemplo, anular, rectangular, etc.) depende, con preferencia, de la geometría en el plano de la estructura escalonada correspondiente.

**[0078]** La figura muestra esquemáticamente los caminos de los rayos de luz e indica las regiones A y B para la misma parte de la lente de la fig. 5. En un plano transversal (x,z), los bordes periféricos 34a y 34b de cada parte lenticular están situados dentro de la parte de interconexión B de una estructura escalonada correspondiente en la superficie trasera opuesta.

**[0079]** Considerando la sección de lente que se extiende entre los bordes periféricos 34b y 34c que definen el elemento lenticular 23b que corresponde a una estructura escalonada 24b en la superficie trasera, un primer rayo 30, el cual es incidente perpendicularmente al plano de la superficie delantera en el primer borde 34b del elemento lenticular 23b, pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir en la faceta en pendiente 29 de la estructura escalonada correspondiente 24b en un primer punto de interceptación 32. Un segundo rayo 31 paralelo al primer rayo 30 e incidente en el segundo borde 34c de los elementos lenticulares pasa a través de la lente mientras que es refractado para incidir en la faceta en pendiente 29 de la estructura escalonada correspondiente en un segundo punto de interceptación 33. La región que se extiende entre el primer y segundo puntos de interceptación dentro de la faceta en pendiente 29 define la región de focalización A de la estructura escalonada 24b. Puede definirse análogamente una región de focalización de la estructura escalonada 24a que se extiende entre el punto de interceptación 36 en la faceta en pendiente de la estructura de un tercer rayo 35 perpendicular a la superficie delantera e incidente en un primer borde periférico 34a del elemento lenticular 23a y el punto de interceptación 37, siempre en la superficie en pendiente de la estructura 24a, del primer rayo 30 incidente en el borde 34b.

**[0080]** La faceta en pendiente de una estructura escalonada (por ejemplo 24a o 24b) se extiende por una primera longitud y la parte de faceta en pendiente entre el primer y segundo puntos de interceptación se extiende menos que la primera longitud.

**[0081]** En general, los rayos de luz perpendiculares a un plano de incidencia y que impactan en los elementos lenticulares son refractados y dirigidos hacia las regiones de focalización donde la superficie trasera se aproxima bastante a un perfil ideal de las estructuras escalonadas.

**[0082]** La faceta de despulla de cada estructura escalonada se extiende entre dos extremos de faceta de despulla, los cuales corresponden generalmente a las crestas y los valles. Una vez que se definen como antes las regiones de focalización, se define una región de interconexión B entre una primera región de focalización de una primera estructura escalonada y una segunda región de focalización de una segunda estructura escalonada adyacente siguiente, comprendiendo las regiones de interconexión los extremos de la faceta de despulla de la primera estructura escalonada.

**[0083]** Con la provisión de una superficie delantera de forma lenticular según la invención, el perfil de la superficie y/o la estructura de la lente de las regiones de interconexión B de la lente refringente no afectan a la radiación que surge de la superficie trasera de la lente. Esto permitirá la relajación de los requisitos de fabricación sin pérdida de eficiencia óptica de la lente.

**[0084]** En un aspecto de la presente invención, se proporciona un procedimiento para diseñar una lente

escalonada, que comprende seleccionar una pluralidad de parámetros de entrada de la lente. Lo siguiente es una lista no exhaustiva de tales parámetros de entrada: el grosor mínimo,  $s_{\min}$ , de la lente; el índice de refracción de la lente; la posición del foco óptico con respecto a la lente (un solo punto si la lente es monofocal o una pluralidad de puntos si la lente es multifocal); el número de estructuras escalonadas; el ángulo de despulla y el paso,  $P$ , para cada estructura escalonada; el número de elementos lenticulares (igual al número de estructuras escalonadas) o el radio (o más en general el tamaño transversal) de la lente, la relación de aspecto y la anchura,  $w_L$ , de cada elemento lenticular que corresponde a una estructura escalonada respectiva. Con preferencia, la anchura,  $w_L$ , de cada elemento lenticular se toma para que sea igual al paso,  $P$ , de la estructura escalonada correspondiente. Se define una dirección incidente principal, que representará la incidencia perpendicular, y a partir de eso un plano de incidencia perpendicular a la dirección incidente principal.

**[0085]** Después de la selección de los parámetros de entrada y de la dirección incidente principal, el procedimiento de diseño de la lente comprende calcular el perfil de la región de focalización de cada estructura escalonada usando los parámetros de entrada para cada estructura y su elemento lenticular correspondiente. En particular, el camino óptico de un primer rayo incidente perpendicularmente en un primer borde periférico del elemento lenticular que corresponde a cada estructura escalonada dentro de la lente y que surge de la superficie trasera de la lente, se calcula aplicando la ley de Snell. La posición en la cual el camino óptico del primer rayo intercepta la superficie trasera, es decir, el punto de salida del rayo, constituye el primer punto de interceptación de la faceta en pendiente de la estructura escalonada respectiva, el cual define en la superficie trasera un primer borde de la región de focalización. Igualmente, se calcula un segundo punto de interceptación de la faceta en pendiente de la misma estructura escalonada de manera que se determina la extensión de la región de focalización. Con preferencia, el procedimiento comprende además determinar el perfil de la región de focalización calculando el camino óptico de los rayos normales incidentes en el elemento lenticular en una pluralidad de posiciones incidentes intermedias a los dos bordes periféricos. La forma de la faceta en pendiente puede ser plana o cóncava. Los resultados pueden obtenerse resolviendo numéricamente ecuaciones diferenciales parciales de una o dos dimensiones con la ayuda de un paquete de análisis numérico comercial, tal como MATLAB®.

**[0086]** En el apéndice A se informa de una breve descripción de las ecuaciones que, según una realización, pueden emplearse para determinar el perfil escalonado de una lente refringente.

**[0087]** La figura 7 informa sobre un ejemplo de un perfil de lente simulado para una lente Fresnel monofocal que resulta de la solución numérica de las ecuaciones diferenciales basadas en la aplicación de la ley de Snell, según el procedimiento descrito anteriormente. Los parámetros de entrada fueron los siguientes: distancia focal de 0,21 m; material polimérico de la lente con índice de refracción de 1,491; veintiuna estructuras escalonadas de paso máximo de 4 mm; grosor mínimo,  $s_{\min}$ , de 3 mm, y elementos lenticulares esféricos de radio,  $R_L$ , de 8 mm. La lente tiene una simetría axial (sólo se muestra la mitad de la lente en la figura). Los rayos de luz perpendiculares al plano de incidencia son refractados una primera vez cuando entran en la lente y una segunda vez cuando salen de la lente. Dichos rayos perpendiculares surgen de la lente sólo en las secciones que contribuyen a la focalización del haz incidente. La presencia de los elementos lenticulares desvían los rayos de las regiones de interconexión que comprenden las facetas de despulla, las crestas y los valles del perfil escalonado trasero.

**[0088]** La figura 8 es una vista esquemática en corte transversal parcial que ilustra dos elementos lenticulares ejemplares de la superficie delantera de una lente escalonada según una realización de la presente invención. Tal como se describió anteriormente, los elementos lenticulares pueden estar caracterizados por una relación de aspecto,  $H/w_L$ . En algunas realizaciones, los elementos lenticulares tienen, en una vista en corte transversal, una forma circular con radio,  $R_L$ . Algunas otras realizaciones pueden englobar elementos lenticulares con forma no circular y sección transversal generalmente curvada.

**[0089]** Dependiendo también de la relación de aspecto de los elementos lenticulares, los bordes periféricos del perfil lenticular pueden presentar características agudas o ser redondeados (tal como se ejemplifica esquemáticamente en la fig. 8), como resultado del procedimiento de moldeo. En general, la redondez de un borde periférico de un elemento lenticular puede representarse mediante al menos un radio de curvatura,  $r_1$ . En el ejemplo de la fig. 8, se supone que la redondez está representada por un radio de una circunferencia tangente a dos elementos lenticulares adyacentes siguientes (estando centrada alrededor del borde periférico común entre los dos elementos). Puede definirse una región de transición de anchura  $w_1$  entre dos elementos lenticulares adyacentes siguientes. El ángulo  $\delta$  subtendido por las tangentes de los dos perfiles lenticulares adyacentes en las inmediaciones de la región de transición puede seleccionarse para que sea relativamente grande, por ejemplo,  $\delta = 160^\circ$ , permitiendo así un fácil moldeo de esa región. La anchura de tales regiones normalmente es mucho menor que la anchura de las regiones B correspondientes (típicamente inferior al 10 % de la anchura de las regiones B) y su

influencia negativa sobre la eficiencia óptica total de la lente es, por tanto, insignificante.

5 **[0090]** En la aplicación para concentradores solares, para concentrar las radiaciones solares con factores de concentración de 500x a 1000x sobre células fotovoltaicas que tienen un área superficial de entrada de aproximadamente de 1 mm<sup>2</sup> a 100 mm<sup>2</sup>, las lentes Fresnel puede estar diseñadas, por ejemplo, con estructuras escalonadas que tienen un paso, P, de aproximadamente 1 a 1,5 mm. Los inventores han observado que, en muchos casos prácticos de interés, las regiones de interconexión de las estructuras escalonadas pueden ocupar del 5 al 10 % de la lente, es decir, ~50-100 μm. Por ejemplo, para elementos lenticulares con relación de aspecto de 0,025, las lentes con redondez de las regiones de transición entre dos elementos lenticulares adyacentes siguientes

10 pueden tener un radio de curvatura,  $r_i$ , de 20 μm, el cual corresponde a una anchura,  $w_i$ , de la región de transición del orden de unos pocos micrómetros, aproximadamente al menos un factor de diez inferior a la anchura de las regiones de interconexión de la lente B. Por lo tanto, en muchos casos de interés, las posibles imperfecciones del contorno de la superficie delantera no influyen significativamente en el rendimiento óptico de la lente.

15 **[0091]** En general, dependiendo entre otras cosas del paso del perfil escalonado y del grosor mínimo de la lente, los elementos lenticulares pueden estar provistos de una relación de aspecto relativamente baja. Generalmente, cuanto más bajo sea el grosor mínimo de la lente,  $s_{min}$ , mayor es la convexidad de los elementos lenticulares, por consiguiente mayor su relación de aspecto. La provisión de elementos lenticulares con relación de aspecto relativamente baja permite el moldeo de la superficie delantera de la lente con un factor de reproducibilidad

20 relativamente alto.

**[0092]** En algunas realizaciones, la relación de aspecto de los elementos lenticulares está comprendida entre 0,005 y 0,05.

25 **[0093]** Por ejemplo, se diseña una lente Fresnel circular o una lente prismática provista de elementos lenticulares con forma de sección transversal circular y que está construida de PMMA que tiene los siguientes parámetros:

diámetro de la lente: 100 mm

30 número de estructuras escalonadas: 20

paso: 2,5 mm

índice de refracción del PMMA: 1,4935

35

radio de los elementos lenticulares: 6 mm

grosor mínimo,  $s_{min}$ : 3 mm

40 **[0094]** En el ejemplo dado, para radios de curvatura R1 y R2 de las facetas de las estructuras escalonadas de aproximadamente 50 μm, se calculó que la anchura de las regiones de interconexión B era de aproximadamente 0,15 mm entre las regiones A de cada estructura escalonada. Según una primera aproximación, la pérdida de eficiencia óptica de la lente, donde la superficie delantera es sustancialmente plana, habría sido de  $0,15/2,5=6\%$ . Para una pluralidad de elementos lenticulares que tienen un radio de curvatura,  $r_i$ , en el borde entre dos elementos

45 lenticulares adyacentes siguientes de 30 μm, la anchura,  $w_i$ , de la región donde se espera que se produzcan inexactitudes de la superficie delantera debido al moldeo es de aproximadamente 6 μm. La pérdida de eficiencia óptica debido a la redondez de los bordes de los elementos lenticulares para tal lente es de aproximadamente  $0,006/2,5=0,24\%$ .

50 **[0095]** Las figuras 4 a 7 se refieren a una lente escalonada "plana", en la cual los elementos lenticulares de la superficie delantera están situados en un plano principal delantero común que puede tomarse como el plano incidente y las estructuras escalonadas de la superficie trasera están situadas en un plano trasero principal común, sustancialmente paralelo al primer plano principal. Sin embargo, la presente invención engloba una lente escalonada en la que los elementos lenticulares y/o las estructuras escalonadas están situados en una superficie no plana y

55 generalmente curvada. En particular, los bordes periféricos de los elementos lenticulares pueden estar situados en una superficie curvada. Por ejemplo, la lente escalonada puede tener una superficie delantera en forma de cúpula de manera que los elementos lenticulares están dispuestos en una superficie convexa hacia el exterior y las estructuras escalonadas están dispuestas en una superficie trasera cóncava.

**[0096]** En algunas realizaciones, el grosor medio de la lente no es mayor de 4 mm, con preferencia de 3 mm a 4 mm. Con preferencia, el grosor mínimo,  $s_{\min}$ , de la lente no es menor de 3 mm y, con preferencia, no mayor de 5 mm.

5 **[0097]** En algunas realizaciones preferentes de la invención, la profundidad de la faceta de despulla, ( $s_{\max}-s_{\min}$ ), para cada estructura escalonada no es mayor de aproximadamente 1 mm.

**[0098]** La figura 9a ilustra una vista esquemática en planta desde arriba de un concentrador solar 40 que comprende un conjunto de células solares que forman un módulo fotovoltaico donde las células están dispuestas en  
10 filas y columnas y que comprende un conjunto de lentes Fresnel 41, estando dispuesta cada lente en correspondencia con una célula solar respectiva (no visible en la fig. 9a). La figura 9b es una vista esquemática en perspectiva de una unidad de módulo 40a que comprende una célula solar individual tomada a lo largo de la línea CC de la fig. 9a. El concentrador solar 40 puede llevarse a cabo ensamblando una pluralidad de unidades de módulo. Las lentes Fresnel tienen una forma cuadrada en una vista en planta y comprenden una superficie delantera  
15 con respecto a los rayos incidentes y una superficie trasera, comprendiendo la superficie trasera una pluralidad de estructuras escalonadas 46 dispuestas concéntricamente alrededor de un eje óptico con una geometría anular en un plano perpendicular al eje óptico. La lente Fresnel 41 actúa como un elemento óptico primario y está orientada con respecto a la radiación solar con la superficie trasera hacia una célula solar 42. La superficie delantera comprende una pluralidad de elementos lenticulares convergentes 47, correspondiendo cada elemento lenticular a una  
20 estructura escalonada 46 para prefocalizar el haz incidente en las regiones de focalización de la superficie trasera de la lente. Cada unidad de módulo puede comprender un elemento óptico secundario (SOE) 43 que sirve como "embudo" de luz para dirigir la luz enfocada por la lente Fresnel sobre la célula. Por ejemplo, el elemento óptico secundario puede comprender una pirámide truncada invertida reflectante con la abertura menor coincidente con el perímetro de la célula fotovoltaica. En una realización, la célula solar 42 está montada en un receptor de soporte 48  
25 que se encarga tanto de la disipación térmica como del aislamiento eléctrico del alojamiento 45 de la célula solar. Un difusor térmico 44 está conectado al receptor 48 para disipar el calor que está asociado al funcionamiento de la célula y la concentración de los rayos solares.

**[0099]** En una realización, la superficie delantera de la lente escalonada y, con preferencia, también la superficie  
30 trasera de la lente, están revestidas con un revestimiento antirreflectante.

**[0100]** En una realización, el perfil de los elementos lenticulares de la lente escalonada está adaptado para que tenga estructuras escalonadas en las cuales las facetas en pendiente son segmentos planos, cuando se ve en un  
35 plano transversal, y para que los rayos incidentes sobre la lente converjan en una región monofocal común.

**[0101]** Las lentes escalonadas construidas mediante moldeo están construidas, con preferencia, de materiales poliméricos, tales como metacrilato de polimetilo (PMMA), poliestireno, o policarbonato.

**[0102]** En las realizaciones precedentes, se ha hecho referencia particular a una incidencia perpendicular a un  
40 plano de incidencia a través de la superficie delantera. En caso de aplicaciones de concentradores solares que hacen uso de seguidores solares, los cuales siguen la dirección del sol durante el día, la condición de incidencia perpendicular representa una buena aproximación de la dirección de la radiación incidente durante el funcionamiento del concentrador solar. Sin embargo, la exactitud de seguimiento de la mecánica, la precisión del montaje y la dilatación térmica de los materiales que forman los elementos ópticos ponen en práctica una tolerancia de la  
45 incidencia fuera del eje del concentrador solar.

**[0103]** Además, las pequeñas desalineaciones entre las partes del equipo de seguimiento y/o entre los componentes del sistema óptico (por ejemplo desalineaciones ópticas entre la lente primaria y el SOE) y la célula solar pueden contribuir a desviar la incidencia de la normal.

50 **[0104]** Los inventores han observado que, incluso para una lente óptica escalonada que presenta un perfil escalonado agudo "ideal", para algunas aplicaciones, puede resultar ventajoso proporcionar un sistema óptico para concentración fotovoltaica que sea capaz de funcionar eficientemente dentro de un ángulo de desviación de la normal relativamente amplio, por ejemplo hasta aproximadamente  $2^\circ$  cuando el factor de concentración es  
55 aproximadamente 500x o superior.

**[0105]** Tal como se describió anteriormente, mediante la provisión de una lente escalonada según los principios generales de la invención y en el supuesto de incidencia perpendicular de radiación, la lente puede diseñarse proporcionando una pluralidad de elementos lenticulares, correspondiendo cada uno a una estructura escalonada

respectiva de la superficie trasera, configurada para dirigir los rayos incidentes sobre una región de localización deseada A comprendida dentro de la parte en pendiente de las estructuras escalonadas.

**[0106]** La figura 10 ejemplifica el posible camino óptico de un rayo incidente desviado de la normal en una lente escalonada, la cual puede ser, por ejemplo, una lente Fresnel convencional (sólo se muestran dos estructuras escalonadas). Por simplicidad, se supone que la superficie delantera de la lente está situada en un plano incidente principal. La lente Fresnel 50 tiene una superficie delantera 54 que está situada en el plano incidente 52 y una superficie trasera que comprende una pluralidad de estructuras escalonadas. En las presentes realizaciones, las estructuras escalonadas 57 y 58 tienen un perfil "ideal" con facetas de despulla normales al plano incidente. El rayo de luz 51 incide con un ángulo de desviación  $\alpha$  con respecto al eje 53 perpendicular al plano incidente 52 en la superficie delantera 54 y que representa la dirección normal. El rayo 51 es refractado en la superficie de separación con la superficie delantera de la lente y, dependiendo del valor del ángulo  $\alpha$ , en lugar de alcanzar la faceta en pendiente de la estructura escalonada 57 y luego ser refractado correctamente hacia la región focal, puede impactar en la faceta de despulla 56 en el punto 55 y ser reflejado totalmente hacia la faceta en pendiente 57. Finalmente sale a través de la faceta en pendiente de la estructura escalonada 57 con un ángulo diferente. Por lo tanto, el rayo desviado de la normal puede ser refractado por la superficie trasera para salir de la lente con una dirección desplazada del foco (ejemplificada por el rayo refractado 59).

**[0107]** Los inventores han entendido que, proporcionando un perfil lenticular en la superficie delantera de la lente, una vez que se determinan las regiones de focalización de las estructuras escalonadas, es posible diseñar la lente de tal manera que también los rayos que inciden en la superficie delantera de la lente con un ángulo de desviación dado  $\alpha$  aún están enfocados en la región focal deseada. Con preferencia, el ángulo de desviación es mayor de cero y no mayor de  $2^\circ$ .

**[0108]** En una realización, se define una región de focalización ampliada, A', para cada estructura escalonada alargando la faceta en pendiente fuera de la región A, más allá del primer y segundo puntos de interceptación, una primera y una segunda parte respectiva. En una realización, la región de focalización ampliada se determina mediante prolongación analítica del segmento A (región de focalización) en ambos lados opuestos, es decir, más allá del primer y segundo puntos de interceptación.

**[0109]** La figura 11 es una vista esquemática en corte transversal que muestra una sección de lente que corresponde a una única estructura escalonada para ejemplificar la refracción de la radiación perpendicular al plano de incidencia y de la radiación que tiene un ángulo de desviación  $\alpha$  respecto a la dirección perpendicular. La sección de lente 60 muestra un elemento lenticular 61 comprendido en la superficie delantera de la lente y que es opuesto a una estructura escalonada en la superficie trasera de la lente que tiene una faceta en pendiente 66 y una faceta de despulla 67. Un primer rayo 62 que tiene una primera dirección incidente que da en un primer borde periférico 76 del elemento lenticular es refractado en un rayo 80 que pasa por la lente e incide en la faceta en pendiente 66 de la estructura escalonada en un primer punto de interceptación 71. En algunas realizaciones preferentes de la invención, los elementos lenticulares están situados en un plano de incidencia común y el primer rayo 62 es perpendicular al plano común. Un segundo rayo 63 paralelo al primer rayo 62 y que da sobre un segundo borde periférico 77 del elemento lenticular 61 es refractado en un rayo 79 que pasa por la lente e incide en la faceta en pendiente en un segundo punto de interceptación 68. El rayo refractado 79 es refractado de nuevo en el primer punto de interceptación para salir de la lente a lo largo de una dirección 74 hacia una zona focal. La parte de faceta en pendiente tomada en un plano transversal de la lente que comprende la primera y segunda direcciones incidentes y que se extiende entre el primer y segundo puntos de interceptación 71 y 68 define la longitud de focalización,  $L_1$ , de la faceta en pendiente. Siendo L la longitud de la faceta en pendiente en el plano transversal y extendiéndose entre los extremos 82 y 83 de la faceta en pendiente, en las realizaciones preferentes de la invención, la parte de faceta en pendiente de la región de focalización A tiene una longitud  $L_F < L$ . La región de focalización A se extiende en la superficie trasera de la estructura escalonada por un área de longitud  $L_F$ .

**[0110]** A continuación se considera una radiación incidente fuera del eje. Específicamente, un tercer rayo 64 incidente en el primer borde periférico 76 en un ángulo  $\alpha$  respecto a la primera dirección incidente es refractado y da en la faceta en pendiente en un tercer punto de interceptación 70 que está más próximo al extremo 82 de la faceta que el primer punto de interceptación 71. Un cuarto rayo 65 incidente en el segundo borde periférico 77 en un ángulo  $\alpha$  respecto a la primera dirección es refractado y da en la faceta en pendiente en un cuarto punto de interceptación 69 que está más próximo al extremo 83 de la faceta que el segundo punto de interceptación 68. La parte de faceta en pendiente tomada en el plano transversal de la lente y que se extiende entre el tercer y cuarto puntos de interceptación 71 y 68 define una región de focalización ampliada A' de la faceta en pendiente, comprendiendo la región de focalización ampliada la región de focalización A. En el plano transversal, la longitud  $L_1'$  de la región de

focalización ampliada no es menor que  $L_1$  y para ángulos sustancialmente diferentes de cero, por ejemplo mayores de  $1-1,5^\circ$ , es mayor que  $L_F$ . Con preferencia,  $L_1 < L$ . Con el fin de definir el perfil de la región de focalización ampliada  $A'$ , puede llevarse a cabo una ampliación matemática en el perfil calculado de la región de focalización  $A$ , por ejemplo ajustando el perfil calculado de la región de focalización  $A$  con una función polinómica y prolongando ésta más allá de los extremos de la región de focalización  $A$ .

**[0111]** En la realización descrita con referencia a la fig. 11, se supone que los rayos incidentes son refractados a medida que entran y salen de la lente, es decir, la estructura escalonada es puramente refringente.

10 **[0112]** En la figura, las facetas en pendiente (y la faceta de despulla) se muestran en el plano transversal como segmentos. Sin embargo, pueden ser una línea curvada, concretamente en algunas realizaciones la faceta en pendiente es una superficie curvada. La longitud,  $L$ , de la faceta en pendiente de una estructura escalonada se toma para que sea la distancia entre la cresta y el valle de la estructura.

15 **[0113]** La figura 12 informa de los resultados para un perfil de lente simulado obtenido mediante la solución numérica de las ecuaciones diferenciales basadas en la aplicación de la ley de Snell para rayos de luz que inciden con un ángulo de desviación de  $2^\circ$  (sólo se ilustra una parte ejemplar de la lente). Los parámetros de entrada de la lente son los mismos que los descritos con referencia a la fig. 7. También se observa que en caso de la presencia de un ángulo de desviación de hasta  $2^\circ$ , se impide que la luz salga de la lente en las secciones que corresponden a las  
20 facetas de despulla y en particular a las secciones que incluyen los extremos de las facetas de despulla. Los rayos refractados en las facetas en pendiente son dirigidos a una zona focal respectiva. La pluralidad de zonas focales de radiación incidente en la pluralidad respectiva de estructuras escalonadas forman una región focal.

**[0114]** Aunque se ha hecho referencia a una zona focal de la lente, ha de entenderse que la lente puede estar  
25 diseñada para definir un punto/área focal en combinación con un elemento óptico adicional, tal como un elemento óptico secundario (SOE). En ese caso, la región focal es la del sistema óptico que comprende una lente escalonada primaria y un SOE.

**[0115]** También se observa que la invención engloba una lente escalonada en la cual cada estructura escalonada  
30 tiene un punto focal respectivo o una zona focal respectiva.

**[0116]** La figura 13 ilustra una lente óptica escalonada según una realización adicional de la invención. Específicamente, la fig. 13 es una vista en perspectiva de una lente prismática 100 que comprende una superficie  
delantera 105 y una superficie trasera opuesta 106. La superficie trasera 106 comprende una parte central 104 y una  
35 pluralidad de estructuras escalonadas contiguas 102 dispuestas hacia el exterior en dirección opuesta a la parte central 104. La superficie delantera 105 comprende una pluralidad de elementos lenticulares contiguos 101, teniendo cada elemento lenticular un primer y un segundo borde periférico 107a y 107b y estando dispuesto en correspondencia con una estructura escalonada respectiva 102 en un plano transversal (x,z). El plano de incidencia es el plano (x,y). Siendo, en esta realización, los elementos lenticulares contiguos, un borde periférico de un  
40 elemento lenticular es en común con un borde periférico de un elemento lenticular adyacente siguiente. La anchura de cada elemento lenticular definido por sus bordes periféricos es sustancialmente igual al paso de la estructura escalonada respectiva. La forma de los elementos lenticulares cuando se ve en una vista en planta desde arriba es cuadrada o rectangular y corresponde sustancialmente a la forma de las estructuras escalonadas en una vista en planta de la superficie trasera.

45 **[0117]** La figura 14 muestra un ejemplo de un perfil de lente calculado para una lente prismática. En las abscisas, la anchura de la lente está en mm y en las ordenadas el perfil de la lente está en mm; sin embargo, las escalas no son iguales en los dos ejes, de manera que las pendientes sólo son esquemáticas y no realistas. La lente tiene una anchura total en un plano perpendicular al eje óptico de 22,5 mm, cinco estructuras escalonadas y foco lineal  
50 colocado en (0,-100 mm) en el plano transversal. Los elementos lenticulares tienen una sección transversal circular con radio,  $R_L$ , de 12 mm y las estructuras escalonadas tienen una anchura de 5 mm. Para cada punto de la superficie delantera de un elemento lenticular, un punto de la faceta en pendiente de la estructura escalonada correspondiente se calcula siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. La región de focalización de cada estructura escalonada se extiende 0,2 mm en cada lado más allá de los puntos de interceptación ajustando la región  
55 de focalización con un polinomio cúbico. En este ejemplo, el perfil de las facetas en pendiente es curvado hacia el interior de la lente, es decir, cóncavo.

**[0118]** En algunas aplicaciones, las lentes ópticas puramente refringentes pueden presentar limitaciones físicamente inherentes al concentrar la radiación incidente.

- [0119]** Generalmente, una lente óptica está caracterizada por el número  $f$ ,  $f$ , el cual es la distancia focal,  $F$ , dividida por el diámetro de la lente, considerando, sólo por simplicidad, una lente circular. Por razones de compacidad y modularidad de los concentradores fotovoltaicos, a veces se prefiere que la distancia focal de la lente óptica concentradora no sea demasiado grande, por ejemplo, mayor de 150-200 mm, dependiendo el valor de muchos factores, tales como los detalles de construcción del concentrador fotovoltaico. Además, el solicitante ha observado que, por un ángulo de desviación dado desde la incidencia perpendicular, el desplazamiento en el plano focal es mayor para una distancia focal más grande.
- 10 **[0120]** Por otra parte, cuanto más pequeño sea el número  $f$ , más radiación tiene que desviarse a través de la lente desde la dirección incidente para concentrarse hacia un punto o área focal, es decir, la zona focal. Además, para la radiación que incide en la superficie trasera en ángulos menores que el ángulo crítico, la parte de la luz reflejada, la cual se perderá de la concentración, aumenta cuando el ángulo se aproxima al ángulo crítico, especialmente en caso de una lente escalonada refringente con un número  $f$ ,  $f$ , relativamente pequeño, disminuyendo así la eficiencia de la lente. En la práctica, un número  $f$  inferior a 1-1,2 puede disminuir la eficiencia del sistema óptico concentrador hasta un nivel inaceptable.
- 20 **[0121]** Cuando la radiación incidente incide en una faceta de las estructuras escalonadas de la superficie trasera con un ángulo igual o mayor que el ángulo crítico, tiene lugar reflexión interna total (TIR) y, en esa faceta, toda la radiación es reflejada, prácticamente sin pérdida. El solicitante se ha dado cuenta de que en algunas aplicaciones, en particular en algunas aplicaciones fotovoltaicas, el uso de una lente óptica escalonada que use reflexión interna total, sola o en combinación con refracción, puede resultar ventajoso. Como generalmente es posible diseñar una estructura escalonada de TIR con un ángulo de salida relativamente, concretamente proporcionando una desviación relativamente grande de la radiación incidente mediante la lente, es posible producir una lente de alta eficiencia, por ejemplo cercana al 90 % para una lente construida de PMMA, que tenga una distancia focal relativamente corta, por ejemplo no mayor de 150 mm, y con preferencia no mayor de 100 mm.
- 25 **[0122]** El solicitante ha observado que, para un paso dado, una estructura escalonada de TIR puede ser hasta tres veces más profunda que una estructura escalonada refringente. Esto puede magnificar el problema de fidelidad de reproducción de las estructuras en las lentes moldeadas con respecto a una lente escalonada puramente refringente. Por ejemplo, empleando técnicas de moldeo comunes tales como el moldeo por inyección en la fabricación de lentes poliméricas, en muchos casos es necesario un ángulo de despulla finito, por ejemplo  $4^\circ$ , para permitir la extracción de la lente del molde, aumentando así la redondez de las estructuras.
- 30 **[0123]** En una lente escalonada de TIR para concentración de radiación, la faceta de despulla tiene una función óptica y, en consecuencia, en lentes convencionales que usan TIR, tiene que ser definida con exactitud. En particular, la luz incide sobre la superficie delantera, es decir, la superficie de separación delantera que convencionalmente es un segmento plano, da sobre la faceta en pendiente reflectante de una estructura escalonada, la cual la redirige sobre la faceta de despulla de la misma estructura, refractando a su vez el rayo que sale. La superficie de despulla constituye de ese modo una superficie de separación refringente para la radiación incidente.
- 35 **[0124]** Los inventores han entendido que la provisión de una superficie delantera que tiene un perfil lenticular, en la cual un elemento lenticular convergente está dispuesto en correspondencia con cada estructura escalonada de TIR, permite dirigir la radiación incidente sólo sobre una parte "central" de las facetas de despulla de las estructuras escalonadas, es decir, para evitar que la radiación incidente choque con la superficie trasera en correspondencia con las crestas y los valles de las estructuras. Esto permite un mayor grado de flexibilidad en el diseño y/o la fabricación de la lente, ya que la redondez de las crestas y los valles de las estructuras escalonadas pueden tolerarse, al menos para la radiación incidente normal. Por ejemplo, en una lente escalonada de TIR con una superficie delantera que comprende una pluralidad de elementos lenticulares que tienen un radio de curvatura de 5 a 100  $\mu\text{m}$ , son posibles ángulos de despulla entre aproximadamente  $2^\circ$  y  $6^\circ$  formados por la faceta de despulla con la normal al plano incidente de la lente sin pérdida significativa de eficiencia óptica con respecto a un ángulo de despulla cero.
- 45 **[0125]** La figura 15 ilustra una parte de una lente escalonada que comprende una pluralidad de estructuras escalonadas de TIR espaciadas transversalmente, según una realización de la presente invención. Cada estructura escalonada 92 comprende una faceta en pendiente 93 y una faceta de despulla 94. En la superficie delantera que recibe la radiación incidente, representada por la flecha 90, está provista una pluralidad de elementos lenticulares 91, correspondiendo cada elemento lenticular a una estructura escalonada respectiva 92 en la superficie trasera
- 50
- 55

opuesta. La faceta en pendiente 93 forma un ángulo de pendiente  $\vartheta$  con el plano incidente que atraviesa la superficie delantera. La reflexión interna total se produce cuando el ángulo de incidencia del rayo con la normal a la superficie es mayor que el denominado ángulo crítico de la superficie de separación, el cual viene dado por  $\arcsin(1/n)$ , siendo  $n$  el índice de refracción de la lente. Un rayo de luz entra a través de un elemento lenticular de la superficie delantera 5 y da en la faceta en pendiente 93 con ángulo  $\Phi > \arcsin(1/n)$ , la cual lo redirige por reflexión hacia la superficie de separación de salida (faceta de despulla 94), comprendiendo las dos facetas de las estructuras escalonadas y la superficie delantera de la lente las superficies de separación activas para ese rayo.

10 **[0126]** El perfil lenticular en la superficie delantera está configurado para prefocalizar la radiación incidente sobre la región de focalización de la faceta en pendiente y redirigir la radiación reflejada sobre la región de la faceta de despulla que no incluye la cresta y el valle. Los rayos de luz 90a y 90b entran en los bordes periféricos respectivos de un elemento lenticular 91 y da en la faceta en pendiente 93 en el primer y segundo puntos de interceptación respectivos 98 y 99 para ser reflejados hacia la faceta de despulla 94. Los rayos reflejados en los puntos de interceptación 98 y 99 inciden en la faceta de despulla en los puntos de interceptación respectivos 96 y 97 para ser 15 refractados y salen de la lente como los rayos 95a y 95b dirigidos hacia una zona focal.

20 **[0127]** En una realización, la lente escalonada es una lente híbrida que comprende una pluralidad de estructuras escalonadas que incluyen una primera subpluralidad de estructuras escalonadas refringentes espaciadas transversalmente con respecto a la radiación incidente y una segunda subpluralidad de estructuras escalonadas de TIR espaciadas transversalmente. Con preferencia, la segunda pluralidad de estructuras escalonadas está dispuesta externamente a la primera pluralidad de estructuras escalonadas. Con más preferencia, las estructuras escalonadas de la primera y segunda pluralidad son de forma anular en una vista en planta y la segunda pluralidad de estructuras escalonadas están dispuestas concéntricamente a la primera pluralidad.

25 **[0128]** La figura 16 ilustra una vista en corte transversal parcial de una lente escalonada híbrida, según una realización de la presente invención. La lente 110 es una lente Fresnel que comprende una superficie trasera que tiene un perfil escalonado y una superficie delantera que comprende un perfil lenticular. En la figura sólo se muestra la mitad de la lente. La superficie trasera comprende una pluralidad de estructuras escalonadas que incluye una primera subpluralidad 115 de estructuras escalonadas 117 que están configuradas para refractar la radiación 30 incidente, es decir, el ángulo del rayo incidente en la faceta en pendiente de una estructura de la primera subpluralidad con la normal a la misma faceta en el punto incidente es menor que el ángulo crítico, y una segunda subpluralidad 114 de estructuras escalonadas 116 que están configuradas para usar TIR, es decir, el ángulo del rayo incidente en la faceta en pendiente de una estructura con la normal a la misma faceta es igual o mayor que el ángulo crítico. 35

**[0129]** Con preferencia, la lente 110 tiene una simetría axial alrededor de un eje óptico 119 de manera que la segunda mitad de la lente no mostrada es igual y especular con respecto a la primera mitad. Sin embargo, la realización no está limitada a una lente simétrica axialmente. Por ejemplo, la segunda parte de la lente puede ser diferente de la primera parte, por ejemplo, comprende más o menos estructuras escalonadas en la superficie trasera 40 y, en consecuencia, más o menos elementos lenticulares.

**[0130]** Con preferencia, la lente híbrida es de tipo Fresnel, concretamente ambas estructuras refringente y escalonada de TIR son de forma anular cuando se ve en un plano de incidencia, en este caso perpendicular al eje óptico 119. La primera subpluralidad 115 de estructuras escalonadas refringentes 117 está dispuesta 45 concéntricamente en un plano perpendicular al eje óptico alrededor de una parte central 121 de la superficie trasera. La parte central 121 puede tener una forma lenticular. La segunda subpluralidad 114 está dispuesta periféricamente a la primera subpluralidad 115 de estructuras escalonadas. En particular, las estructuras escalonadas de TIR 116 están dispuestas concéntricamente alrededor del eje óptico y periféricamente con respecto a las estructuras escalonadas refringentes 117. 50

**[0131]** La superficie delantera comprende una pluralidad de elementos lenticulares, estando situado cada elemento lenticular opuesto a una estructura escalonada correspondiente. En particular, una primera subpluralidad 111 de elementos lenticulares 118 está dispuesta opuesta a la primera subpluralidad 115 de estructuras escalonadas y una segunda subpluralidad 112 de elementos lenticulares 113 está dispuesta opuesta a la segunda 55 subpluralidad 114 de estructuras escalonadas. El número de elementos lenticulares de la primera subpluralidad 111 corresponde al número de las estructuras escalonadas de la primera subpluralidad 115. El número de elementos lenticulares de la segunda subpluralidad 112 corresponde al número de las estructuras escalonadas de la segunda subpluralidad 114. Una parte central 120 de la superficie delantera que corresponde a la parte central 121 de la superficie trasera puede comprender un elemento lenticular o ser plana.

**[0132]** Con preferencia, la pluralidad de elementos lenticulares comprende una primera subpluralidad y una segunda subpluralidad. Los elementos lenticulares de la primera subpluralidad corresponden a estructuras escalonadas refringentes. Los elementos lenticulares de la segunda subpluralidad corresponden a estructuras escalonadas de TIR.

**[0133]** Las realizaciones preferentes de la invención ilustradas en las figuras se refieren a una lente óptica que tiene simetría axial. Ha de entenderse que la presente invención engloba una lente escalonada en la cual la pluralidad de estructuras escalonadas están dispuestas asimétricamente en la superficie trasera de la lente y, más en general, la lente no tiene simetría axial.

**[0134]** Aunque las realizaciones preferentes de la invención se refieren a una lente óptica escalonada para concentradores fotovoltaicos y, más en general, para concentradores solares, la lente óptica según la presente invención engloba otras aplicaciones que requieren convergencia de luz desde un área regional relativamente grande hasta una abertura significativamente menor. En particular, la falta de definición de las estructuras escalonadas debido a la baja fidelidad de reproducción puede degradar la calidad de imagen en aplicaciones de formación de imágenes.

**[0135]** Además, el solicitante cree que la provisión de una lente escalonada que permita la convergencia de radiación incidente que está desviada de la normal unos pocos grados puede resultar ventajosa en aplicaciones de formación de imágenes, por ejemplo en proyectores de vídeo y aplicaciones fotográficas.

Apéndice A

**[0136]** Se hace referencia a la fig. 17 para las convenciones de símbolos y ángulos en el sistema de coordenadas usado en este apéndice y en las siguientes ecuaciones.

**[0137]** Se considera una lente óptica escalonada monofocal con índice de refracción  $n$ . Se establece un sistema de coordenadas cartesianas 2D  $(x,z)$  de tal manera que el eje óptico corresponde al eje  $z$  y el origen del sistema está colocado en el centro de uno de los perfiles lenticulares de la lente (en la parte inferior de la figura) con respecto al plano de incidencia que pasa a través del eje  $x$  y perpendicular al eje  $z$ . Se observa que dentro de la descripción de este apéndice y con referencia a la fig. 17, la lente está orientada con la superficie delantera situada hacia abajo de la superficie trasera, de la cual sale la luz, en el semiespacio de valores de  $z$  negativos, donde el eje  $z$ , a diferencia de la convención mostrada en el resto de las figuras, apunta hacia la superficie trasera de la lente.

**[0138]** La radiación incidente incide en un perfil lenticular circular en un punto  $(x_p, z_p)$  en el cual la perpendicular al perfil forma un ángulo  $\gamma$  con el eje  $z$ .

**[0139]** Se calcula el perfil de la superficie trasera de la lente que corresponde al perfil lenticular, con la condición de que la radiación incidente converja a un único punto focal colocado en  $(x_f, z_f)$  y la faceta en pendiente de las estructuras escalonadas refracta la radiación incidente que después sale a lo largo de una dirección convergente. Llamando  $(x_q, z_q)$  a las coordenadas del punto genérico de la faceta en pendiente de una estructura escalonada de la cual sale un rayo genérico, son válidas las siguientes ecuaciones. Por convención, el signo de los ángulos se toma con referencia al sistema de coordenadas.

**[0140]** Con referencia a la fig. 17 y al sistema de coordenadas escogido, el ángulo de salida,  $\beta'$ , formado con el eje  $z$  es:

$$\tan \beta' = \frac{x_q - z_q}{z_q - z_f} \quad (1)$$

**[0141]** Aplicando la ley de Snell, el ángulo de salida  $\beta'$  está relacionado con el ángulo  $\beta$  del rayo refractado por el elemento lenticular y con el ángulo  $\phi$  del rayo refractado por la faceta en pendiente por:

$$n \cdot \sin(\phi + \beta) = \sin(\phi + \beta') \quad (2)$$

donde el ángulo  $\phi$  está definido por

$$\tan \varphi = \frac{dz_q}{dx_q} \quad (3)$$

**[0142]** Aplicando nuevamente la ley de Snell en el punto genérico  $(x_p, z_p)$  del perfil lenticular, el ángulo incidente y puede estar relacionado con el ángulo  $\beta$  por:

$$\sin \gamma = n \sin(\gamma - \beta) \quad (4)$$

10 y con el radio de curvatura del perfil lenticular,  $\rho$ , por:

$$\sin \gamma = -\frac{x_p}{\rho} \quad (5)$$

**[0143]** El rayo refractado que se propaga dentro de la lente está relacionado con las coordenadas de la faceta en pendiente de la estructura escalonada  $(x_q, z_q)$  y con las coordenadas  $(x_p, z_p)$  del punto de entrada en la superficie del elemento lenticular por:

$$\tan \beta' = \frac{x_q - x_p}{z_q - z_p} \quad (6)$$

**[0144]** La ecuación diferencial que determina el perfil de la superficie trasera viene dada por la siguiente relación:

$$\tan \varphi = \frac{dz_q}{dx_q} = \frac{dz_q}{dx_p} \frac{dx_p}{dx_q} \quad (7)$$

Para resolver la ecuación, se toma la coordenada  $x_p$  como variable independiente:

$$25 \quad \frac{dz_q}{dx_p} = \tan \varphi \left( \frac{dx_p}{dx_q} \right)^{-1} = \tan \varphi \left( \frac{dx_q}{dx_p} \right) \quad (8)$$

**[0145]** Como  $x_q = \tan \beta(z_q, z_p) + x_p$ ,

$$\frac{dx_q}{dx_p} = \left[ \frac{d}{dx_p} \tan \beta \right] (z_q - z_p) + \tan \beta \left( \frac{dz_q}{dx_p} - \frac{dz_p}{dx_p} \right) + 1 \quad (9)$$

30 **[0146]** Combinando la ec. (9) con la ec. (8) se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{dz_q}{dx_p} = \frac{\tan \varphi}{1 - \tan \varphi \tan \beta} \left\{ \left[ \frac{d}{dx_p} \tan \beta \right] (z_q - z_p) - \frac{dz_p}{dx_p} \tan \beta + 1 \right\} \quad (10)$$

35 **[0147]** Expresando las cantidades  $\frac{d}{dx_p} \tan \beta$ ,  $\tan \varphi$  y  $\frac{dz_p}{dx_p}$  en términos de  $x_p$ , la ec. (10) puede escribirse como:

$$\frac{dz_p}{dx_p} = -\tan \gamma \quad (11)$$

$$\begin{cases} n \sin(\varphi + \beta) = \sin(\varphi + \beta') \\ n[\tan \varphi \cos \beta + \sin \beta] = \tan \varphi \cos \beta' + \sin \beta' \\ \tan \varphi(n \cos \beta - \cos \beta') = \sin \beta' - n \sin \beta \\ \tan \varphi = -\frac{n \sin \beta - \sin \beta'}{n \cos \beta - \cos \beta'} \end{cases} \quad (12)$$

5 **[0148]** Expresando la ec. (12) en términos de los ángulos  $\beta$  y  $\gamma$ :

$$-\frac{x_p}{\rho} = n \sin(\gamma - \beta)$$

$$\beta - \gamma = \arcsin\left(\frac{x_p}{n\rho}\right)$$

10

$$\frac{d\beta}{dx_p} = \frac{1}{\sqrt{n^2 \rho^2 - x_p^2}} - \frac{1}{\sqrt{\rho^2 - x_p^2}} \quad (13)$$

$$\frac{d \tan \beta}{dx_p} = (1 + \tan^2 \beta) \left[ \frac{1}{\sqrt{n^2 \rho^2 - x_p^2}} - \frac{1}{\sqrt{\rho^2 - x_p^2}} \right]$$

15 **[0149]** Los ángulos  $\beta$  y  $\beta'$  son:

$$\gamma = -\arcsin\left(\frac{x_p}{\rho}\right)$$

$$\beta = \gamma - \arcsin[n^{-1} \sin \gamma] \quad (14)$$

$$\beta' = \arctan \frac{x_f - x_q}{z_f - z_q}$$

**[0150]** Finalmente, la intersección del rayo refractado con la superficie trasera (es decir, la faceta en pendiente) viene dada por:

20

$$\begin{aligned} z_p - z_q(x_q) &= (x_p - x_q) / \tan \beta \\ z_q(x_q) + (x_p - x_q) / \tan \beta - z_p &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

**[0151]** Usando la ec. 15, es posible determinar las coordenadas  $(x_q, z_q)$  de cada punto en la superficie trasera para cada punto de entrada  $(x_p, z_p)$  de un rayo que corresponde a cada punto del perfil lenticular situado en la superficie delantera. De tal manera, se determina el perfil de la región de focalización de la faceta en pendiente.

**[0152]** Repitiendo el mismo procedimiento para todos los elementos lenticulares, pueden determinarse los perfiles de todas las regiones de focalización correspondientes respectivas de las facetas en pendiente, para determinar todo el perfil de la lente.

**REIVINDICACIONES**

1. Un concentrador solar (40) que comprende:
  - 5 al menos una célula solar (42) que comprende una superficie delantera, y
 

un sistema óptico que concentra la radiación solar hacia la célula solar, comprendiendo el sistema una lente óptica escalonada (41; 20; 100; 110) que tiene una superficie delantera (21; 105) para recibir la radiación solar y una superficie trasera opuesta (22; 106) enfrente de la superficie delantera de la célula solar, teniendo la superficie

10 trasera un perfil escalonado que define una pluralidad de estructuras escalonadas (46; 24; 102; 116, 117), en el que:

cada estructura escalonada, en un plano transversal de la lente, tiene una forma de dientes de sierra y está formada por una faceta en pendiente (29; 66; 93) y una faceta de despulla (28; 67; 94), teniendo las facetas en pendiente y de despulla inclinaciones diferentes, estando cada estructura escalonada **caracterizada por** un paso (P), en el que

15 la faceta en pendiente se extiende por una primera longitud en el plano transversal y la faceta de despulla se extiende por una segunda longitud en el plano transversal; la superficie delantera de la lente comprende una pluralidad de elementos convergentes lenticulares contiguos (47; 23; 101; 113, 118), teniendo cada elemento lenticular un primer y un segundo borde periférico y una anchura ( $w_L$ ) que se extiende entre el primer y el segundo bordes periféricos;

20 cada elemento lenticular está situado opuesto a una estructura escalonada correspondiente, correspondiendo el número de la pluralidad de elementos lenticulares al número de la pluralidad de estructuras escalonadas, y

cada elemento lenticular tiene una superficie convexa hacia el exterior en el plano transversal y una anchura igual al

25 paso de la estructura escalonada correspondiente.
  2. El concentrador de la reivindicación 1, en el que la superficie trasera comprende una parte central, estando dispuesta la pluralidad de estructuras escalonadas exteriormente a la parte central.
  - 30 3. El concentrador de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada estructura escalonada tiene un paso comprendido entre 0,1 mm y 10 mm.
  4. El concentrador de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada elemento lenticular tiene un perfil de arco circular en el plano transversal con un radio ( $R_L$ ) igual a al menos tres veces el paso
  - 35 de la estructura escalonada correspondiente.
  5. El concentrador de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los elementos lenticulares tienen una relación de aspecto comprendida entre 0,005 y 0,05.
  - 40 6. El concentrador de la reivindicación 1, en el que el grosor mínimo de la lente no es menor de 3 mm y, con preferencia, no mayor de 5 mm.
  7. El concentrador de la reivindicación 1 o 6, en el que una profundidad máxima de una estructura escalonada se define como la diferencia de longitud transversal entre el grosor máximo y el grosor mínimo de la
  - 45 lente y no es mayor de 1,5 mm, con preferencia no mayor de 1 mm.
  8. El concentrador de una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la lente escalonada es una lente Fresnel (41; 20; 110) con simetría axial y las estructuras escalonadas tienen una forma anular en el plano.
  - 50 9. El concentrador de la reivindicación 1, en el que al menos una primera subpluralidad (114) de la pluralidad de estructuras escalonadas usan reflexión interna total, comprendiendo cada estructura escalonada (92; 116) de la primera subpluralidad una faceta en pendiente reflectante (93) y la faceta de despulla (94) recibe un primer y un segundo rayo (90a, 90b) refractados por la superficie delantera de la lente y reflejados por la faceta en pendiente desde el primer y segundo puntos de interceptación respectivos (98, 99) en el quinto y sexto puntos de
  - 55 interceptación respectivos (96, 97) de la faceta de despulla, y en el que la faceta de despulla se extiende por una segunda longitud en el plano transversal y la parte de faceta que se extiende entre el quinto y el sexto punto de interceptación se extiende dentro de la segunda longitud.
  10. El concentrador de la reivindicación 9, en el que la pluralidad de estructuras escalonadas (114, 115)

comprende además:

una segunda subpluralidad (115) de estructuras escalonadas que usan refracción, en el que cada estructura (117) de la segunda pluralidad comprende una faceta en pendiente refringente, y en el que

5

el primer y el segundo rayo incidente que dan en la faceta en pendiente refringente de una estructura escalonada (117) de la segunda subpluralidad en el primer y el segundo punto de interceptación respectivos de la faceta en pendiente son refractados para salir de la lente.

10 11. Un procedimiento para diseñar una lente escalonada (41; 20; 100; 110) para un concentrador solar, comprendiendo la lente escalonada una superficie delantera para recibir una radiación incidente, y una superficie trasera opuesta que comprende un perfil escalonado que define una pluralidad de estructuras escalonadas (46; 24; 102; 116; 117), teniendo cada estructura escalonada una forma de dientes de sierra en un plano transversal de la lente y estando formada por una faceta en pendiente (29) y una faceta de despulla (28), teniendo las facetas en  
15 pendiente y de despulla inclinaciones diferentes, en el que:

la faceta en pendiente se extiende por una primera longitud en el plano transversal y la faceta de despulla se extiende por una segunda longitud en el plano transversal;

20 la superficie delantera de la lente comprende una pluralidad de elementos convergentes lenticulares contiguos (47; 23; 101; 113, 118), teniendo cada elemento lenticular un primer y un segundo borde periférico y una superficie convexa hacia el exterior en el plano transversal, comprendiendo el procedimiento:

- seleccionar una pluralidad de parámetros de entrada de la lente, incluyendo los parámetros de entrada un grosor  
25 mínimo de la lente; un índice de refracción de la lente; una posición del foco óptico con respecto a la lente; un número de estructuras escalonadas; un ángulo de despulla y un paso para cada estructura escalonada; un número de elementos lenticulares establecido para que sea igual al número de estructuras escalonadas; una relación de aspecto y una anchura de cada elemento lenticular que corresponde a una estructura escalonada respectiva, en el que la anchura se define ente el primer y el segundo borde periférico,

30

- establecer la anchura de cada elemento lenticular para que sea igual al paso de la estructura escalonada correspondiente;

- calcular el perfil de una región de focalización de cada estructura escalonada usando los parámetros de entrada  
35 para cada estructura escalonada y su elemento lenticular correspondiente

calculando, aplicando la ley de Snell, un camino óptico de un primer rayo (30) incidente perpendicularmente en un primer borde periférico (34b) del elemento lenticular (23b) que corresponde a cada estructura escalonada dentro de la lente y que surge de la superficie trasera de la lente, en el que la posición en la cual el camino óptico del primer  
40 rayo intercepta la superficie trasera constituye un primer punto de interceptación (32) de la faceta en pendiente (29) de la estructura escalonada respectiva, el cual define en la superficie trasera un primer borde de la región de focalización, y

calculando, aplicando la ley de Snell, un camino óptico de un segundo rayo (31) incidente perpendicularmente en un  
45 segundo borde periférico (34c) del elemento lenticular y que surge de la superficie trasera de la lente, en el que la posición en la cual el camino óptico del segundo rayo intercepta la superficie trasera constituye un segundo punto de interceptación (33) de la faceta en pendiente (29) de la misma estructura escalonada, el cual define en la superficie trasera un segundo borde de la región de focalización de manera que se determina la extensión de la región de focalización.

50

12. El procedimiento de la reivindicación 11, que comprende además determinar el perfil de la región de focalización calculando el camino óptico de los rayos normales incidentes en el elemento lenticular en una pluralidad de posiciones intermedias al primer y segundo bordes periféricos.

55 13. El procedimiento de la reivindicación 11, en el que, con la condición de que la radiación incidente converja a un único punto focal, el cálculo del perfil de la región de focalización de cada estructura escalonada se efectúa determinando las coordenadas  $(x_q, z_q)$  de cada punto en la superficie trasera como la intersección de un rayo refractado con la superficie trasera para cada punto de entrada  $(x_p, z_p)$  del rayo que corresponde a cada punto del perfil lenticular situado en la superficie delantera según las siguientes ecuaciones:

$$z_p - z_q(x_q) = (x_p - x_q) / \tan \beta$$
$$z_q(x_q) + (x_p - x_q) / \tan \beta - z_p = 0$$

siendo  $\beta$  el ángulo del rayo refractado por el elemento lenticular,

5

comprendiendo además el procedimiento repetir el mismo procedimiento para todos los elementos lenticulares para determinar los perfiles de todas las regiones de focalización correspondientes respectivas de las facetas en pendiente y, en consecuencia, todo el perfil de la lente.

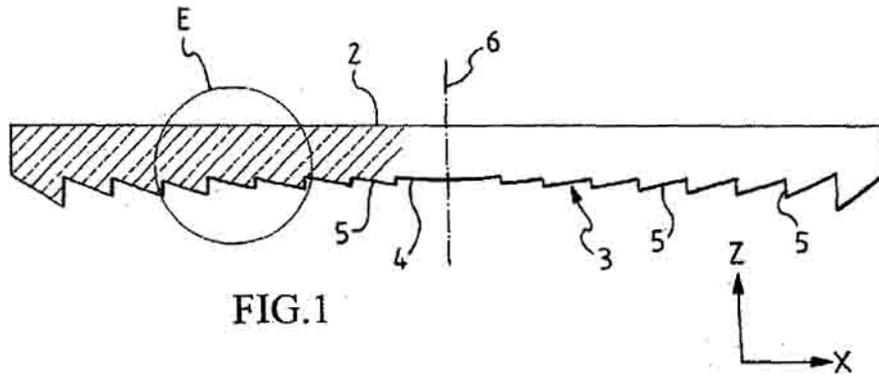


FIG.1

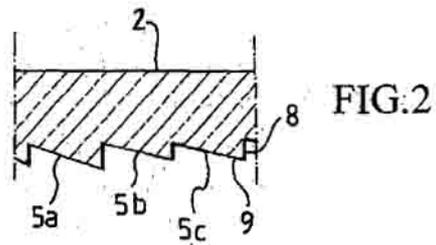


FIG.2

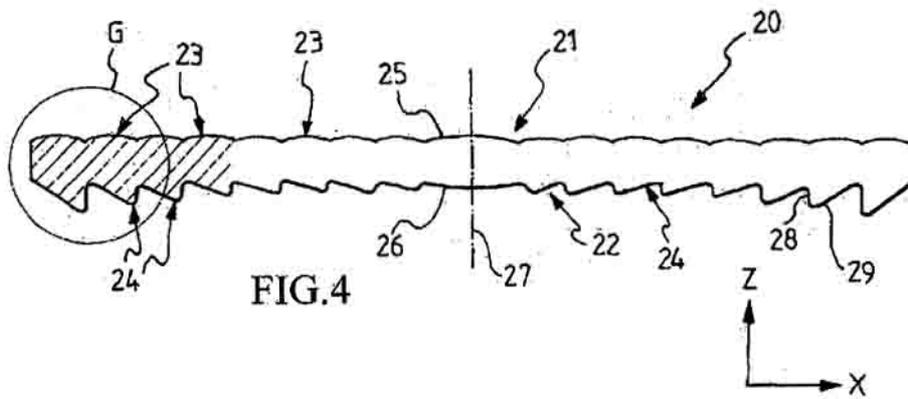


FIG.4

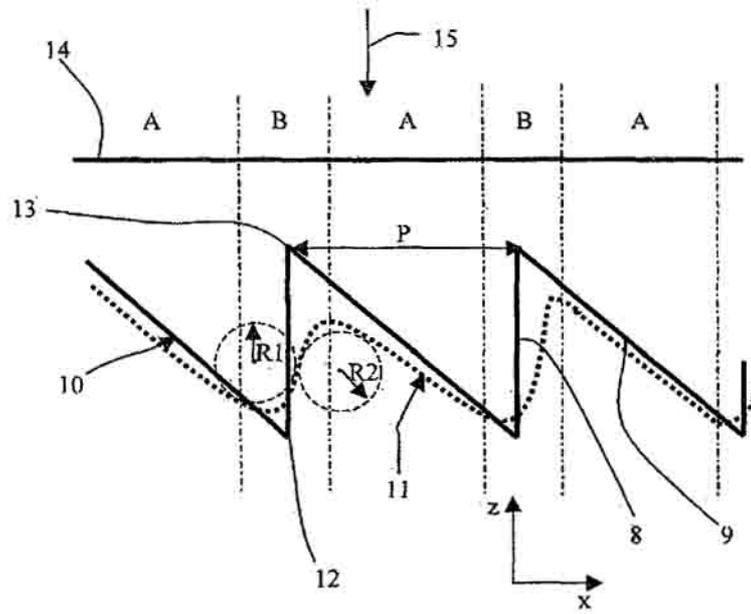


FIG. 3

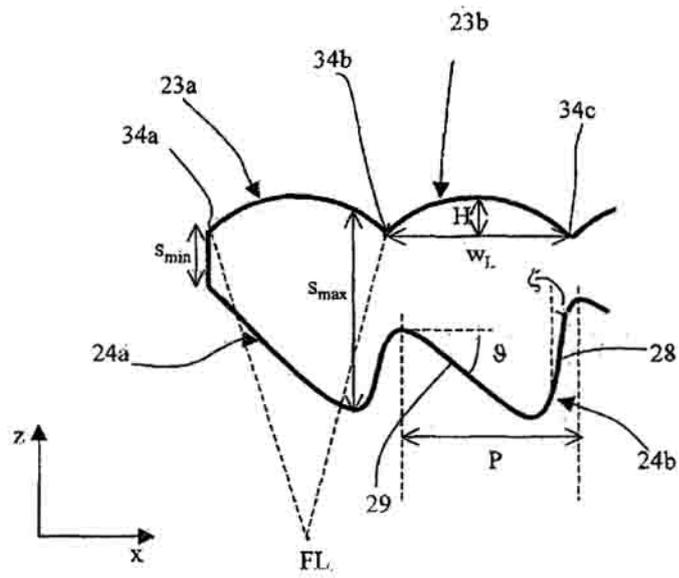


FIG. 5

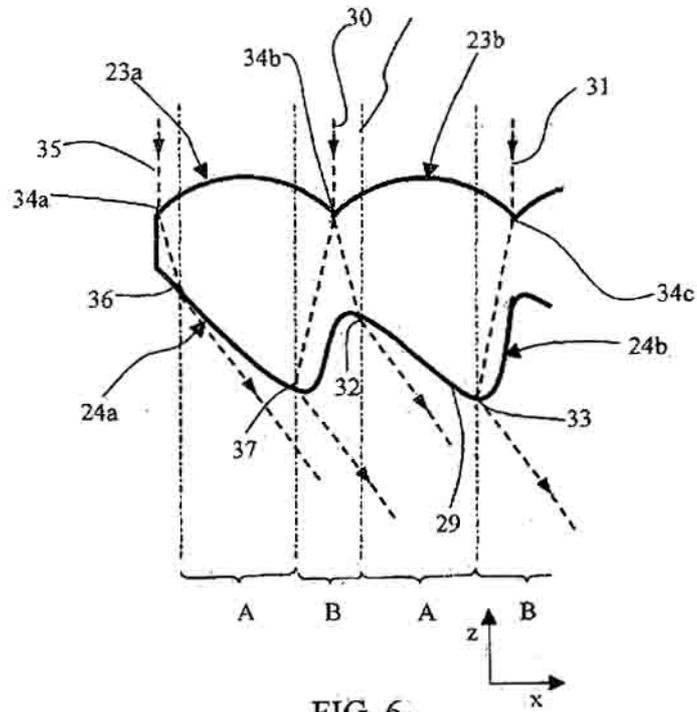


FIG. 6

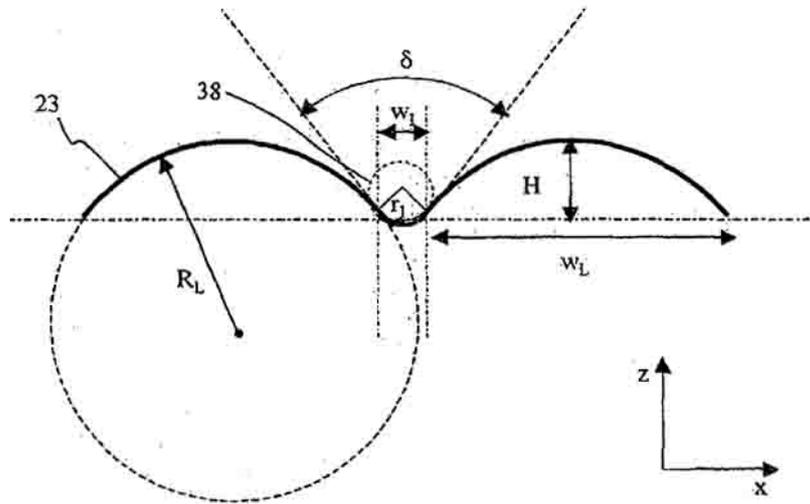


FIG. 8

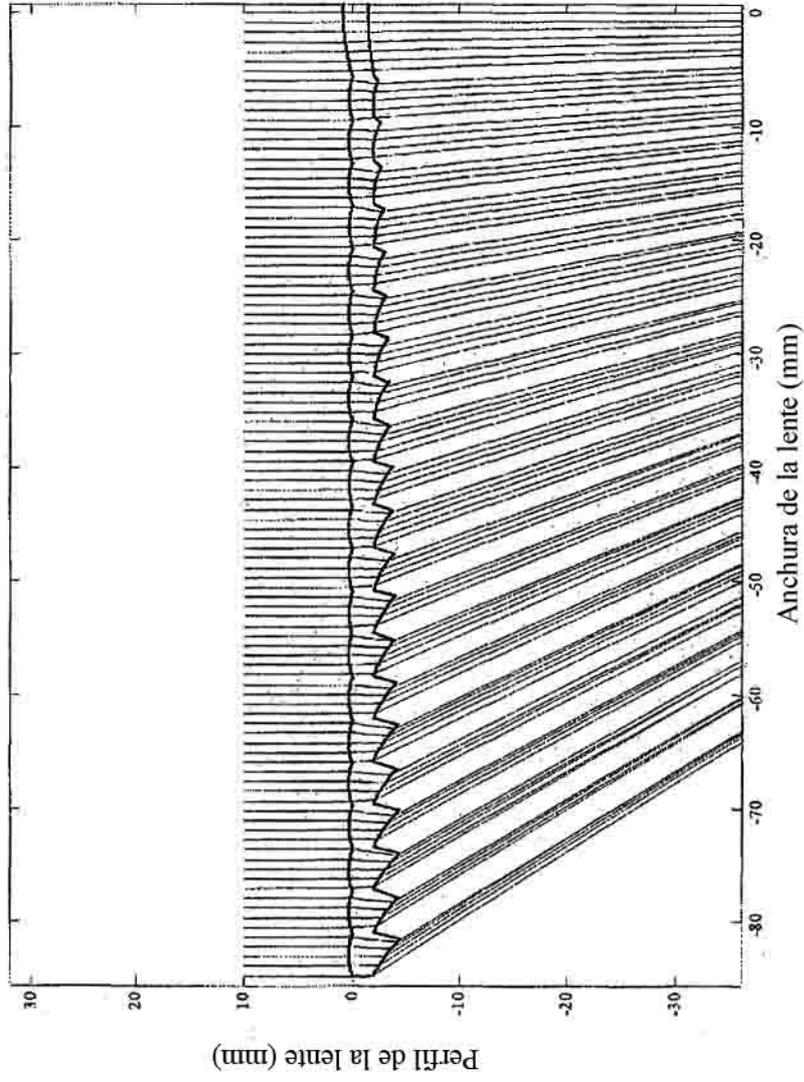
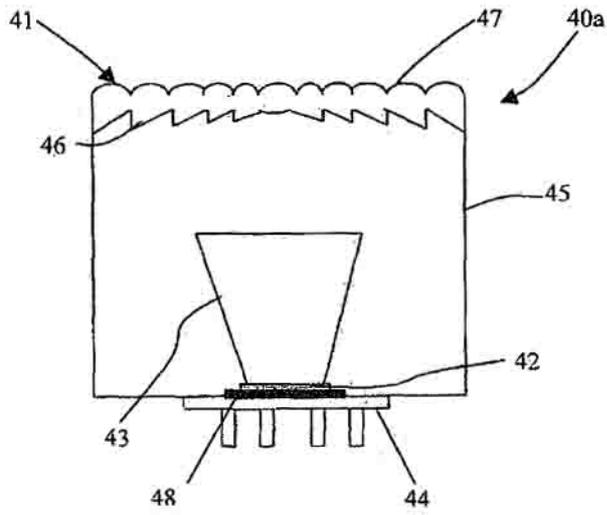
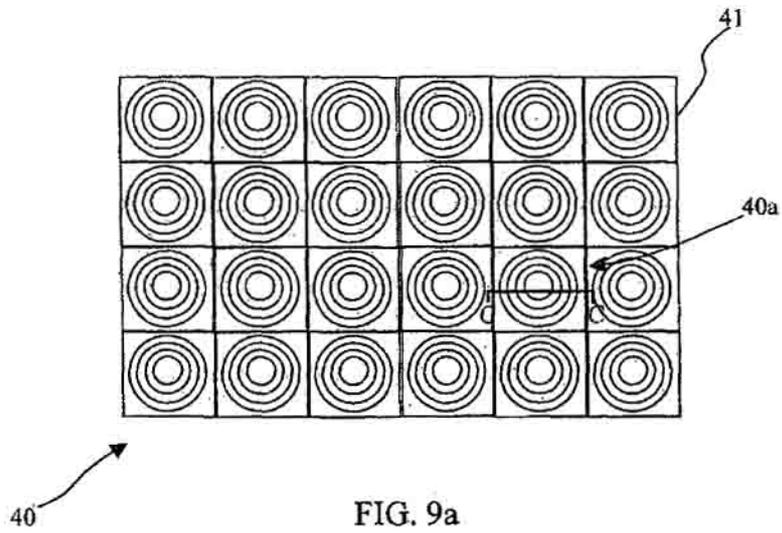


FIG. 7



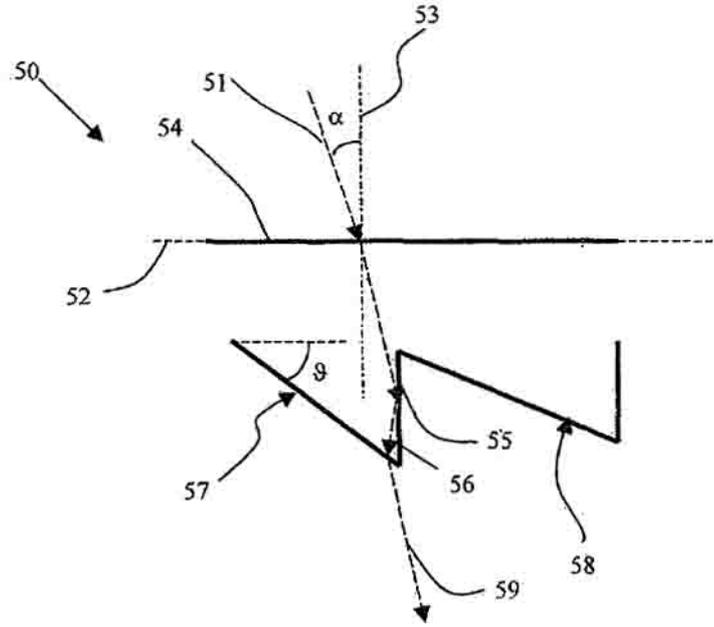


FIG. 10

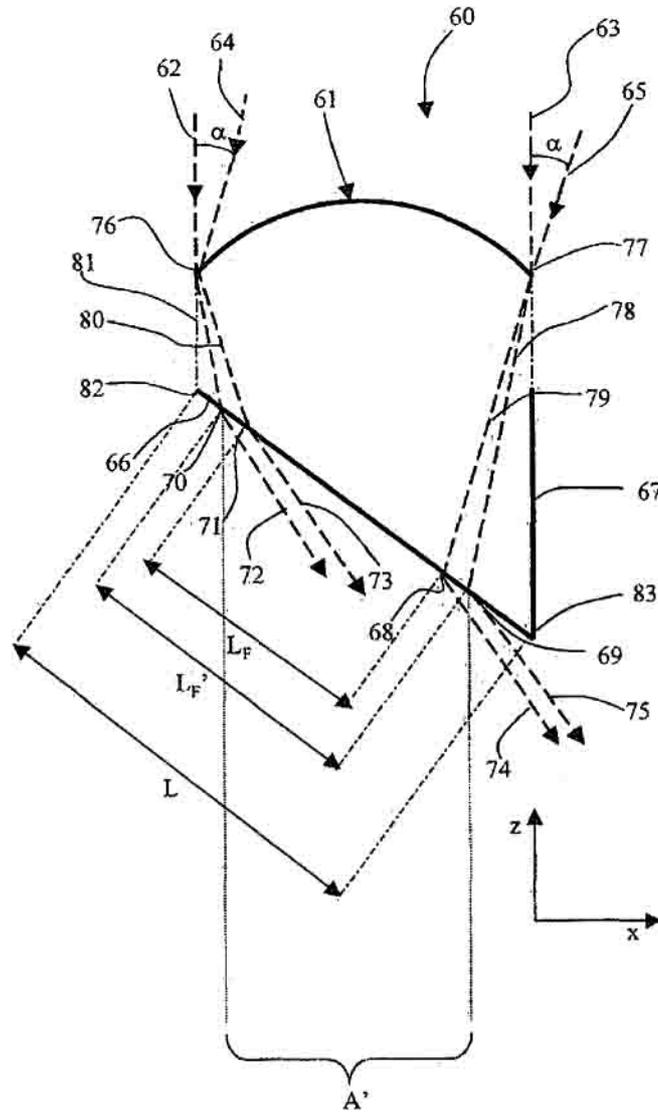


FIG. 11

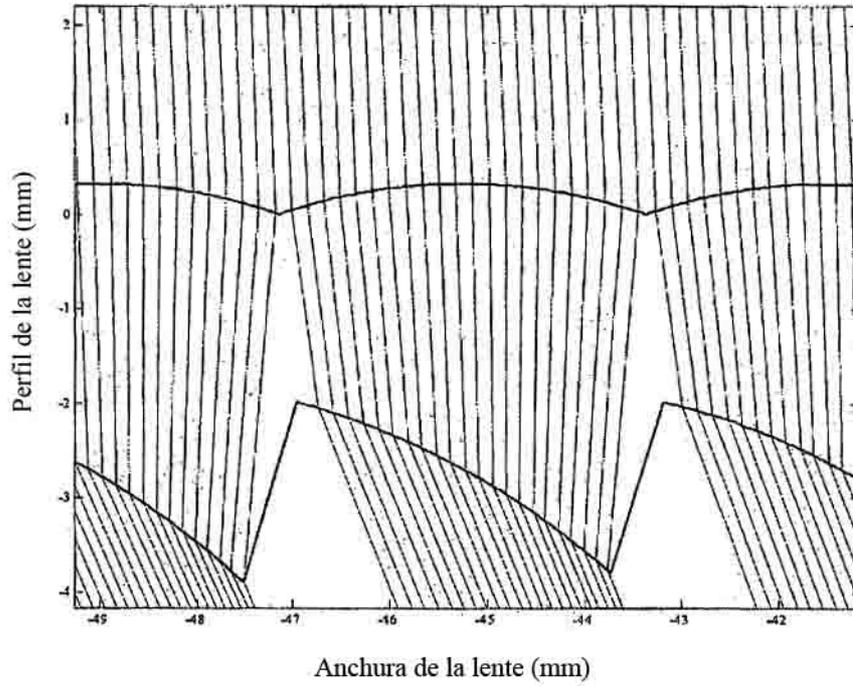


FIG. 12

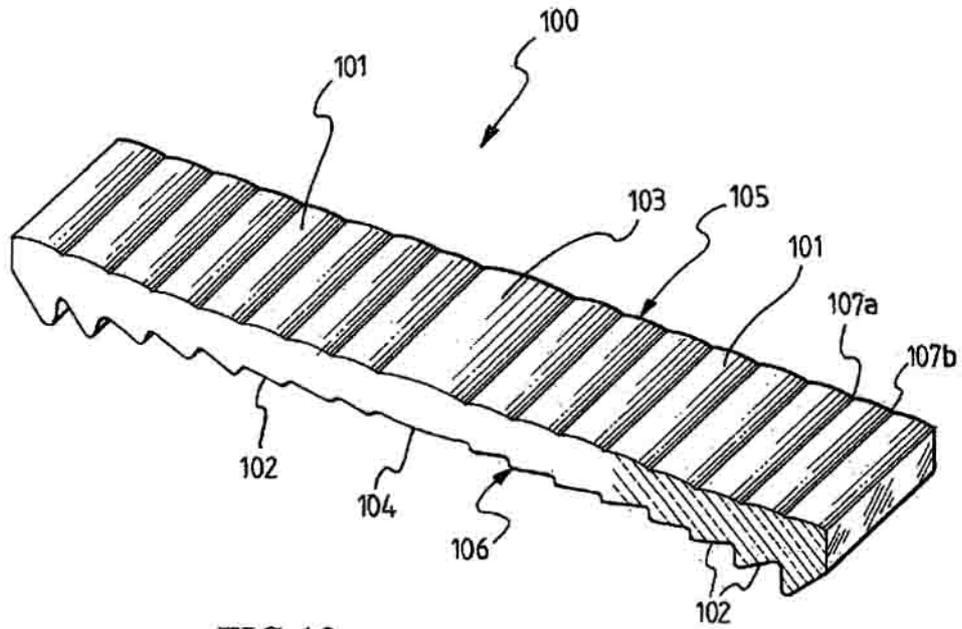
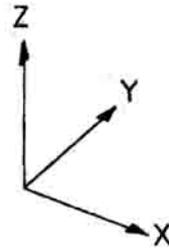


FIG. 13



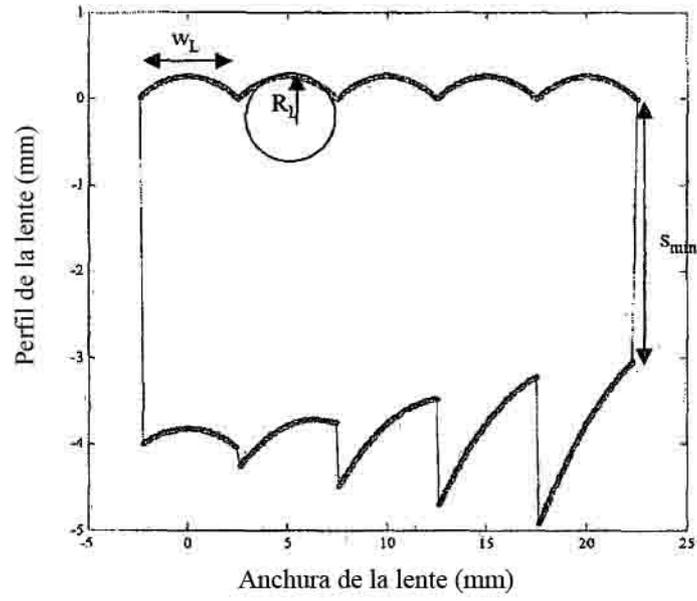


FIG. 14

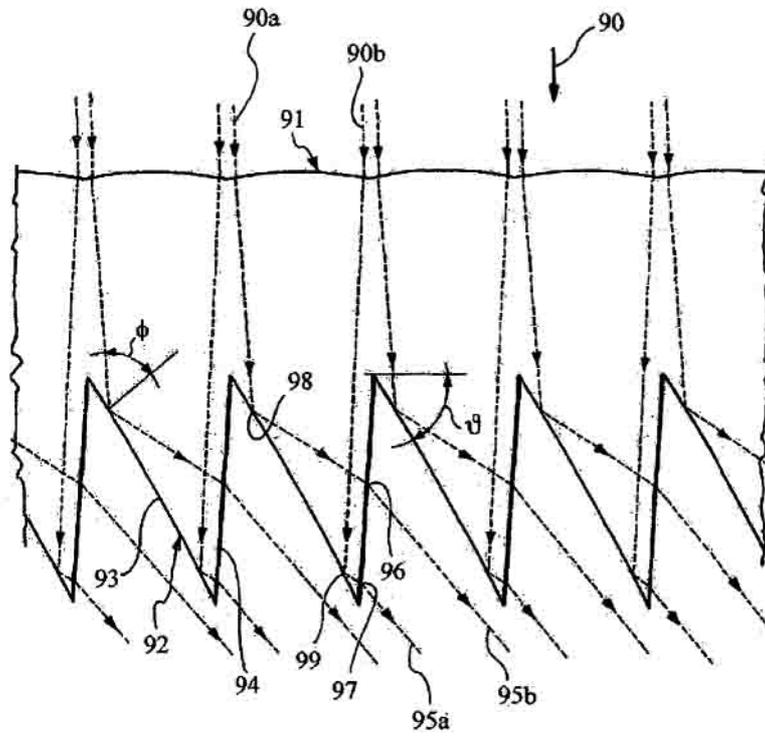


FIG.15

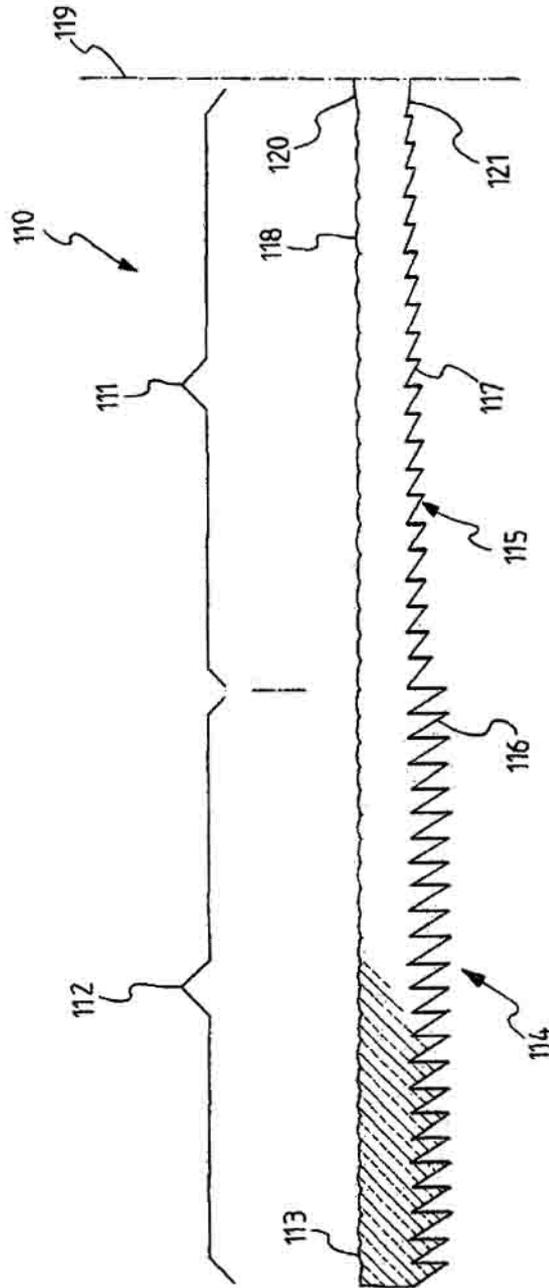


FIG.16

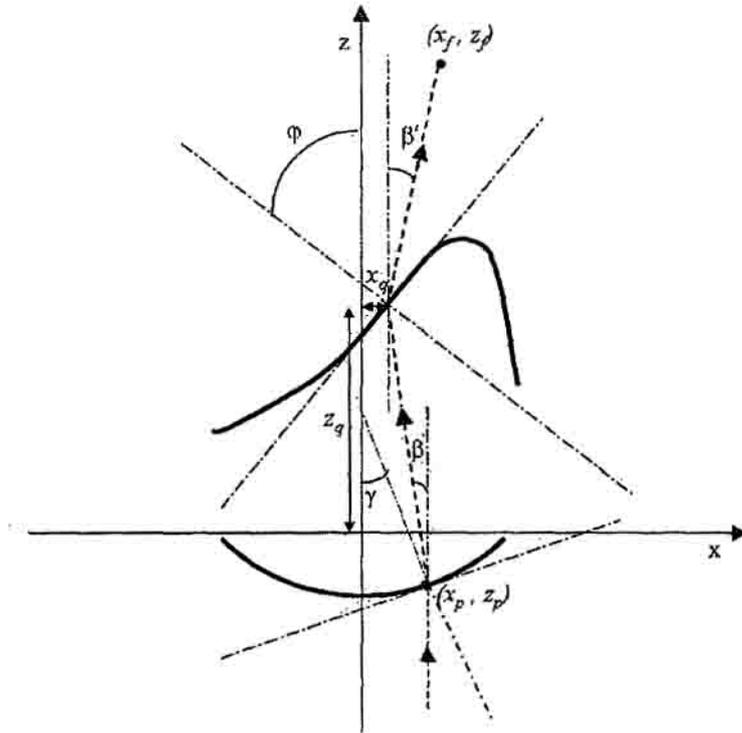


FIG. 17