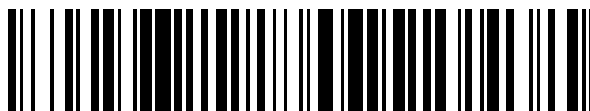


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 709 800**

51 Int. Cl.:

H01L 31/054 (2014.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.07.2015** **E 15176349 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.11.2018** **EP 2975651**

54 Título: **Módulo fotovoltaico que comprende una óptica de concentración con motivos de sublongitudes de onda y generador solar para satélite que comprende dicho módulo**

30 Prioridad:

16.07.2014 FR 1401587

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

17.04.2019

73 Titular/es:

**THALES (100.0%)
Tour Carpe Diem, Place des Corolles, Esplanade
Nord
92400 Courbevoie, FR**

72 Inventor/es:

**LEE-BOUHOURS, MANE-SI LAURE;
LOISEAUX, BRIGITTE;
DIAZ, FRÉDÉRIC y
LEHOUCQ, GAËLLE**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 709 800 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

Módulo fotovoltaico que comprende una óptica de concentración con motivos de sublongitudes de onda y generador solar para satélite que comprende dicho módulo

5 El ámbito de la invención es el de los dispositivos fotovoltaicos que comprenden dispositivos ópticos de concentración que permiten aumentar los rendimientos.

De manera general, en aplicaciones terrestres que usan paneles solares, y en grandes cantidades, es esencial tratar de reducir los costes de los módulos fotovoltaicos usados, mientras aumenta la eficacia.

Para reducir costes, se usan diferentes estrategias. Pueden relacionarse, en particular, con:

- 10 - la célula de material fotosensible usada. Podemos intentar reducir el espesor, usando películas delgadas de material, en sustratos de bajo coste o jugando con la naturaleza misma del material;
- 15 - la arquitectura de la estructura usando sistemas de concentradores de luz que enfocan la luz incidente en una célula de superficie más pequeña para reducir la superficie de material fotovoltaico. La figura 1 representa un módulo concentrador fotovoltaico, que usa una lente de Fresnel basada en microprismas. Por construcción geométrica, somos capaces de reducir en gran medida el tamaño de la célula. Actualmente los factores de concentración son del orden de 500, incluso más, para aplicaciones terrestres. En este caso, un sistema de seguimiento de sol, comúnmente conocido como "tracking" de dos ejes, es necesario para seguir mejor la orientación del sol.

Entre estas diferentes estrategias, los esfuerzos se centran en prioridad en el aumento de la eficacia o el rendimiento de la célula.

20 La tecnología que presenta los mejores rendimientos y que tiene la mayor pendiente de progresión es la denominada tecnología basada en estructura de multijuntura, combinada con un concentrador. Una estructura multijuntura comprende el apilamiento de diferentes uniones constituidas por diferentes materiales sensibles en diferentes rangos de longitudes de onda, teniendo la ventaja de poder captar de manera eficaz todo el rango espectral que constituye el espectro solar. Una estructura multijuntura ofrece un mejor rendimiento que una estructura de unión simple, pero representa un coste mayor debido a su mayor complejidad. Por esto, puede ser interesante combinar una estructura de multijuntura con un concentrador de luz, para reducir en gran medida la superficie de la célula y, por lo tanto, el coste del módulo completo. A título ilustrativo, las figuras 2a y 2b presentan respectivamente:

- 30 - una célula fotovoltaica CV que comprende en el ejemplo ilustrado el apilamiento de materiales M1, M2, M3 y M4 sensibles en rangos de longitudes de onda $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_3$ y $\Delta\lambda_4$;
- un módulo fotovoltaico CPV que usa una concentración óptica O_c y dicha célula CV.

El rendimiento de un módulo CPV de multijuntura es de aproximadamente el 41 % para una triple unión basada en GaInP/GaInAs/Ge, pudiendo alcanzar rendimientos de 44,7 % para una unión cuádruple, (con una simple unión de GaAs, el rendimiento máximo es del orden del 32 %).

35 La figura 3 extraída del artículo de P. Benítez, J.C. Miñano, P. Zamora, R. Mohedano, A. Cvetkovic, Sr. Buljan, J. Chaves, Sr. Hernández, "High performance Fresnel-based photovoltaic Concentrator", Optics Express, volumen 18, S1, página A25-A40 (2010) ilustra diferentes tipos de concentradores que funcionan en transmisión y se usan para módulos fotovoltaicos terrestres y, más precisamente, de izquierda a derecha:

- 40 - un concentrador basado en una lente de Fresnel con microprismas (sin elemento óptico secundario);
- un concentrador con elemento óptico secundario, una cúpula esférica;
- un concentrador con elemento óptico secundario, un componente SILO (SIInGLE Optical surface) propuesto por el laboratorio de Sandia Labs;
- un concentrador con elemento óptico secundario, una pirámide reflectante hueca truncada (XTP), usado por la empresa Amonix;
- 45 - un concentrador con elemento óptico secundario, una pirámide dieléctrica truncada (RTP), que utiliza la empresa Solfocus;
- un concentrador con elemento óptico secundario, un concentrador de Fresnel Köhler (FK) de cuatro cuadrantes, propuesto por Benitez y col.

50 De manera general, la óptica primaria (correspondiente a la parte superior de las configuraciones representadas en la figura 3) se llama lente de Fresnel, llamado de tipo microprisma, basado exclusivamente en el principio de refracción.

55 En efecto, la misma función de focalización se puede mantener eliminando el material siempre que se mantenga la superficie curva. El principio de construcción de tal lente se ilustra en la figura 4. La lente está compuesta por varios microprismas. El uso de microprismas permite un enfoque más compacto que el obtenido con una lente refractiva estándar para la focalización de la luz, como se describe en el artículo de: A. Davis, F. Kuhnlenz "Optical Design

using Fresnel Lenses", Optik & Photonik, Diciembre 2007 N° 4. Tienen la ventaja de ser planas (generalmente entre 200 μm y 3 mm de espesor) con respecto a las lentes refractivas convencionales, pero, como estas últimas, son cromáticas, dependiendo la distancia focal depende de la dispersión del material.

5 Las figuras 5a y 5b ilustran el efecto de esta dispersión del índice de refracción del material sobre la eficacia de la lente (la velocidad de la luz que llega a la célula) para la radiación que emite a una longitud de onda mínima λ_{min} y una longitud de onda máxima λ_{Max} , asumiendo que la célula se coloca equidistantemente de los dos puntos de focalización $f(\lambda_{\text{min}})$ y $f(\lambda_{\text{Max}})$. Debe observarse que la cantidad de luz recogida en λ_{min} , como se representa en la figura 5a (zona gris oscuro) es inferior a la cantidad de luz recogida en λ_{Max} , como se representa en la figura 5b (zona gris claro), las zonas sombreadas correspondientes a la luz perdida.

10 El punto esencial es, por lo tanto, encontrar el mejor compromiso para colocar la célula según el eje óptico (longitudinalmente), para optimizar el rendimiento óptico. Debido al cromatismo, la luz en la longitud de onda λ_{min} se focaliza a una distancia $f(\lambda_{\text{min}})$ diferente de la luz en la longitud de onda λ_{Max} que focaliza en $f(\lambda_{\text{Max}})$. Como la luz del sol es de banda ancha, se trata de encontrar el mejor compromiso para la colocación de la célula. En primer lugar, el primer reflejo de formación de imágenes consiste en colocar la célula equidistante entre los dos puntos de focalización $f(\lambda_{\text{min}})$ y $f(\lambda_{\text{Max}})$. Sin embargo, esta posición no es óptima ya que, desde el punto de vista de la recogida de luz, la cantidad de luz recogida en λ_{min} (zona gris oscuro de la figura 5a) es inferior a la cantidad de luz recogida en λ_{Max} (zona sombreada de la figura 5b), las zonas sombreadas corresponden a la luz perdida.

15 En paralelo con estos sistemas en transmisión, también existen sistemas en reflexión. La figura 6 ilustra algunos ejemplos de sistemas en reflexión basados en sistemas de espejos M que devuelven la radiación luminosa focalizada hacia la célula CV. Su ventaja es su insensibilidad a la longitud de onda, sin embargo, presentan una zona de oscuridad y son más voluminosos.

También debe tenerse en cuenta, por otra parte, además de la eficacia óptica, dos parámetros importantes involucrados en el dimensionamiento de un módulo CPV: la apertura de la fuente y los efectos térmicos.

25 De este modo, es necesario tener en cuenta la noción de ángulo de aceptación, parámetro principal y que es función del factor de concentración. Para aplicaciones terrestres donde los factores de concentración pueden ser muy importantes, los ángulos de aceptación son muy pequeños, del orden de $0,5^\circ$ a 1° . Por lo tanto, es necesario integrar un sistema de seguimiento, generalmente complejo y costoso.

30 Las figuras 7a, 7b y 7c ilustran las restricciones geométricas relacionadas con el diámetro angular del sol θ_s (generalmente $0,5^\circ$) y el ángulo de aceptación α del dispositivo, según tres configuraciones diferentes y esto asumiendo en los tres casos, un tamaño de célula fija y un diámetro de lente fijo. De manera más precisa:

- la figura 7a representa el trazado de rayos cuando el sol está vertical, incidencia llamada "normal". El radio principal son las líneas continuas correspondientes. Los rayos que tienen en cuenta la dimensión del sol están en líneas discontinuas;
- 35 - la figura 7b representa el trazado de rayos cuando el sol gira, incidencia llamada "oblicua". El ángulo de aceptación α se define por el ángulo máximo de inclinación del radio principal para que no abandone la zona sensible;
- la figura 7c representa el trazado de radio en una lente más abierta (correspondiente a una relación focal en diámetro más pequeña), el ángulo de aceptación aumenta.

40 Para aumentar el ángulo de aceptación, se puede, al tamaño de célula constante, aumentar la apertura digital de la lente (para esto es conveniente disminuir la distancia focal de la lente, lo que efectivamente equivale a aumentar la apertura digital ya que se trabaja con un diámetro idéntico). Sin embargo, esto solo se puede realizar si la lente no presenta demasiadas pérdidas ópticas, por lo tanto, no es posible considerar soluciones basadas en lentes de Fresnel con microprismas abiertos. Los microprismas de una lente de Fresnel deben estar más inclinados, en particular, en la periferia. La dispersión cromática, entonces, es más importante, causando pérdida de eficacia óptica, sin mencionar la dificultad de realización de las zonas extremas y reflexiones internas.

45 Un segundo parámetro importante a tener en cuenta es el aspecto térmico. Bajo concentración, es necesario acoplar a la célula un sistema de gestión térmica para mantener una temperatura compatible con la temperatura nominal de uso de la célula y no degradar su rendimiento. Este aspecto puede resultar ser un parámetro limitante para ciertas aplicaciones.

50 Tras el éxito de los módulos fotovoltaicos con concentración de CPV, en el ámbito terrestre, asociando una célula CV de multijuntura de alto rendimiento y un sistema de concentración, estudios más recientes han emergido en el ámbito espacial.

55 En el ámbito espacial, la necesidad se formula al nivel de los paneles solares usados para los generadores solares de los satélites, para los cuales buscamos aumentar el rendimiento como en el ámbito terrestre, no obstante, los desafíos son diferentes de los de las aplicaciones terrestres.

Por una parte, las condiciones ambientales son diferentes, la compacidad y el peso se convierten en criterios mucho

más importantes que en el ámbito terrestre, mientras que el coste del módulo en sí se convierte en un criterio menor.

Por otra parte, los factores de concentración buscados son más bajos que en las aplicaciones terrestres ya que están vinculados a un sistema de rastreo que debe ser más tolerante angularmente debido a su uso, en particular, en la órbita geoestacionaria. Las restricciones de gestión térmica son diferentes de las encontradas en el ámbito terrestre.

Finalmente, entran en juego nuevos criterios, como la compatibilidad con los sistemas de despliegue de paneles.

Hoy en día, se han explorado dos tipos de soluciones de concentración para aplicaciones en el ámbito espacial:

- soluciones de transmisión (generalmente con lentes de Fresnel);
- soluciones en reflexión (sistemas de espejo) pero que resultan ser ineficientes porque tienen problemas de rendimiento relacionados con la contaminación de los espejos en un entorno espacial.

Una comparación de los efectos de fallas de superficie de los concentradores en transmisión y en reflexión se describe, en particular, en el artículo: "Ultra-light stretched Fresnel lens solar concentrator for space power applications", SPIE 48th Annual meeting, San Diego paper 5179-17 (2003).

Se menciona una configuración en transmisión, ilustración del concepto "SLA Stretched Lens Array" y que consta de lentes de Fresnel cilíndricas flexibles fabricadas de polímero de silicón, desplegadas y sostenidas por los arcos que tensan las lentes según la dirección de su mayor dimensión, como se ilustra en las figuras 8a, 8b y 8c. De manera más precisa:

- la figura 8a representa una vista general;
- la figura 8b ilustra las dos posiciones del concentrador, el esquema inferior de la figura: la posición del concentrador en la posición de almacenamiento y durante el lanzamiento del satélite, el esquema superior: la posición después del despliegue de paneles y despliegue de lentes (patente de Entech: US 6 075 200, "Stretched Fresnel lens concentrator for space power", Entech 2000);
- la figura 8c ilustra una sección de la lente estirada después del despliegue del concentrador: "Ultra-light stretched Fresnel lens solar concentrator for space power applications", SPIE 48th Annual meeting, San Diego paper 5179-17 (2003).

La solución de transmisión propuesta por la empresa Entech (EEUU), comprende células de triple unión combinadas con lentes cilíndricas obtenidas estirando una película de silicón. Las lentes curvadas están constituidas por una lente, permitiendo la función de concentración geométrica, combinada con microprismas que permiten corregir las aberraciones cromáticas (controlando la focalización de los rayos en función de la longitud de onda). El ángulo de cada prisma se determina para minimizar las aberraciones cromáticas. Cabe señalar que esta optimización de la eficacia también se ve facilitada por el hecho de que el tamaño de la célula es relativamente grande (factor de baja concentración).

Desde un punto de vista operativo, después del lanzamiento del satélite, este sistema se despliega en dos etapas:

- una primera etapa correspondiente al despliegue de los paneles solares;
- una segunda etapa correspondiente al despliegue de los concentradores gracias a un sistema de curvatura mecánica, pudiendo esta última etapa constituir un riesgo significativo de un despliegue deficiente (por lo tanto, una no operatividad de los paneles y, por lo tanto, un generador solar) y requiere una fase de calificación terrestre, medios de prueba particularmente costosos.

De manera general, Cabe señalar que las técnicas de concentración también pueden combinarse ventajosamente con técnicas de separación espectral, que consisten en separar espacialmente (lateralmente) el espectro solar, como en el enfoque propuesto por el Centro Espacial de Lieja (CSL) y descrito en el artículo de: C. Michel y col., "Study of solar concentrator for space, based on a diffractive/refractive combination", "Renewable Energy and the Environment, OSA, SM2A2 (2012).

Mediante el uso de módulos multijuntura para su amplio espectro de sensibilidad de longitud de onda, sin embargo, las limitaciones relacionadas con este tipo de módulos deben ser superadas. Las dos limitaciones principales de los módulos multijunturas son, de hecho, los siguientes:

- la condición de acuerdo de malla entre los materiales en las interfaces entre las uniones (lo que lleva a reducir la eficacia intrínseca de los materiales cuando se apilan). La primera limitación limita la elección de materiales y, por lo tanto, limita la implementación en una mejor combinación en términos de eficacia;
- la condición de adaptación de corriente: estando las uniones conectadas en serie, la unión menos eficaz limita la corriente para el conjunto de uniones. Además, debido a la dependencia de las diferentes uniones entre ellas, la estructura multijuntura es más sensible a los cambios no calibrados en el espectro o al envejecimiento de una unión.

Usando diferentes uniones simples, y con técnicas de separación espectral lateral, se pueden obtener las siguientes

ventajas combinadas:

- un mejor rendimiento teórico a través de:
 - o la eliminación de las pérdidas de adaptación relacionadas con las interfaces entre las uniones;
 - o la posibilidad de usar diferentes materiales, posiblemente mejor adaptados al espectro;
 - 5 o la posibilidad de implementar un antirreflejo de mejor rendimiento, ya que está optimizado en cada unión horizontal;
 - o una temperatura de funcionamiento más baja gracias a la distribución en una superficie más grande del flujo concentrado, lo que permite la relajación de las restricciones al nivel de la gestión térmica, por lo tanto, reducir el coste de este último y funcionar a una eficacia óptima.
- 10 - un flujo luminoso sobre una superficie más grande (tres veces más grande en el caso de tres uniones separadas horizontalmente (o lateralmente) con relación a una triple unión vertical), permitiendo, o bien, facilitar la gestión térmica, que es un punto esencial, en particular, para las aplicaciones espaciales de baja concentración o para las aplicaciones terrestres de alta concentración, o bien, para mantener la gestión térmica inicial y usar las células a una temperatura más baja y, por lo tanto, ofrecer un mejor rendimiento;
- 15 - el uso de varias células dispuestas horizontalmente permite multiplicar el número de uniones en el plano horizontal, para un mejor rendimiento. Este no es el caso de una multijuntura vertical en la que el número de uniones se limita debido a las condiciones de adaptación de la malla. También hace posible adaptar la superficie de las uniones de forma independiente entre sí (ya que están distribuidas horizontalmente) para captar más flujo en las celdas con menor rendimiento, para estandarizar las eficacias de las diferentes uniones para un montaje en serie óptimo y evitar que la unión menos eficaz limite la corriente para el conjunto de las uniones.
- 20

Desde un punto de vista tecnológico, las soluciones de separación espectral han sido publicadas/patentadas y usan esencialmente micropismas refractivos. En la solicitud de patente US 2014 0130855 "dispersive optical systems and methods and related electricity generation systems and methods" se describen ejemplos de arquitecturas para la separación espacio-cromática; y en US 2012 0312351 "efficient solar energy concentrator with improved thermal management" figura 9a: arquitectura en la proyección y figura 9b: arquitectura de prismas.

En este complejo contexto de integración de muchos parámetros, la presente invención tiene por objeto un módulo fotovoltaico de altos rendimientos, volumen reducido y adecuado tanto para aplicaciones terrestres como espaciales. El módulo fotovoltaico de la invención presenta una gran compacidad y una alta eficacia que permite mejorar aún más los rendimientos de las soluciones de la técnica anterior y, en particular, para aplicaciones en el ámbito espacial a fin de no requerir varias operaciones sucesivas de despliegue en el espacio de paneles solares y de concentradores, como en la técnica anterior.

Más precisamente, el objeto de la presente invención es un módulo fotovoltaico que comprende al menos una célula fotovoltaica y al menos un dispositivo óptico de concentración, destinado a ser iluminado por un flujo luminoso que emite al menos una longitud de onda de iluminación λ_i que pertenece a una banda de longitudes de onda definida por una longitud de onda mínima λ_{\min} y una longitud de onda máxima λ_{\max} , siendo dicha banda de longitudes de onda la de la radiación solar del orden de [380 nm-1600 nm], caracterizado porque:

- dicho dispositivo óptico de concentración es un componente monolítico y comprende al menos una estructura difractiva que consta de motivos de sublongitud de onda, definidos en un material denominado estructurado;
- teniendo dichos motivos al menos una dimensión inferior o igual a la longitud de onda de iluminación promedio λ_c situada entre λ_{\min} y λ_{\max} dividida por el índice de refracción de dicho material estructurado;
- 40 - estando dichos motivos separados entre sí por distancias de sublongitudes de onda definidas entre centros de motivos adyacentes;
- garantizando dicho dispositivo óptico de concentración al menos una función de focalización y una función de difracción.

45 Según una variante de la invención, presentando dicha estructura difractiva comprende motivos de sublongitudes de onda secundaria distancias definidas entre centros de motivos adyacentes, periódicos.

Según una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración comprende dos estructuras difractivas que constan de motivos de sublongitud de onda, definidos en al menos un material denominado estructurado, de las que una garantiza una función de focalización.

50 Según una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración comprende dos estructuras difractivas en cada una de sus caras.

Según una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración comprende una estructura difractiva que consta de motivos de sublongitud de onda secundaria y óptica refractiva.

Según una variante de la invención, la óptica refractiva consta de al menos una lente refractiva de superficie curva.

55 Según una variante de la invención, la óptica refractiva comprende al menos una lente de Fresnel que consta de un

conjunto de micropismas con un tamaño de aproximadamente uno a unas centenas de micrones.

Por ejemplo, estos micropismas pueden tener una dimensión de entre 1,3 mm y 110 μm sobre un espesor de 20 μm . Dichos micropismas pueden tener el mismo ancho, pero presentar diferentes alturas, un ancho típico de los micropismas puede ser del orden de 100 μm para una longitud focal de 5 mm.

- 5 Según una variante de la invención, la óptica refractiva está realizada del mismo material que el material estructurado que consta de dichos motivos de dimensiones de sublongitud de onda.

Según una variante de la invención, los motivos son pilares o agujeros.

- 10 Según una variante de la invención, el dispositivo de concentración comprende una estructura difractiva con motivos de dimensiones de sublongitud de onda definidos en el material denominado estructurado que presenta una función de corrección de aberración longitudinal y/o una función de separación espectral lateral.

Según una variante de la invención, el dispositivo de concentración comprende una zona central y zonas externas;

- estando cada zona compuesta por motivos de tipo pilares de sección redonda o cuadrada y/o agujeros de sección redonda o cuadrada;
 - las dimensiones de dichos motivos varían de una zona a otra para codificar una variación del índice efectivo y, por lo tanto, una variación de fase, pudiendo dichas variaciones de dimensión ser monótonas o no.
- 15

Según una variante de la invención, los motivos presentan dimensiones laterales menores o iguales a 350 nm y siendo el espaciado entre el centro de dos motivos consecutivos de aproximadamente 350 nm y una altura del orden de 1 a unas pocas micrones.

- 20 Según una variante de la invención, dicha célula fotovoltaica comprende un apilamiento de materiales, realizando una estructura multijuntura llamada vertical, siendo cada uno de dichos materiales al menos sensible en una subbanda de longitudes de onda, que pertenece a dicha banda de longitudes de onda, $\Delta\lambda = [\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}]$.

- 25 Según una variante de la invención, dicha célula fotovoltaica comprende un conjunto de subcélulas elementales adyacentes fotovoltaicas en un mismo plano que comprende materiales sensibles en subbandas de longitudes de onda, perteneciente a dicha banda de longitudes de onda $\Delta\lambda = [\lambda_{\text{min}}, \lambda_{\text{max}}]$, con el fin de constituir una estructura multijuntura denominada horizontal.

Según una variante de la invención, el módulo fotovoltaico comprende subconjuntos de células elementales fotovoltaicas, ubicadas en diferentes planos.

Según una variante de la invención, el módulo fotovoltaico comprende subcélulas elementales fotovoltaicas que presentan diferentes tamaños entre sí.

- 30 Según una variante de la invención, la óptica refractiva está realizada del mismo material que el material estructurado que consta de dichos motivos de dimensiones de sublongitud de onda.

Según una variante de la invención, dicho material estructurado es un dieléctrico de tipo sílice, vidrio, Si_3N_4 , o en material polimérico que puede ser polidimetilsiloxano (PDMS), o polimetacrilato de metilo (PMMA), o policarbonato (PC).

- 35 Según una variante de la invención, las dimensiones de los motivos son inferiores o iguales a 350 nm de ancho y del orden de 1 a 2 μm de altura.

Según una variante de la invención, las dimensiones de los motivos son del orden de 80 nm a 250 nm de ancho o de diámetro, de 1 a 2 μm de altura.

Según una variante de la invención, los motivos son agujeros y pilares.

- 40 Según una variante de la invención, el módulo fotovoltaico con concentración comprende un conjunto de células elementales fotovoltaicas.

Según una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración comprende un conjunto de microlentes, estando cada microlente acoplada a una estructura difractiva que consta de motivos de dimensiones de sublongitud de onda.

- 45 Según una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración comprende un conjunto de lentes Fresnel con micropismas, estando cada lente de Fresnel acoplada a una estructura difractiva que consta de motivos de dimensiones de sublongitud de onda.

La invención también tiene por objeto a un panel solar para generador solar para satélite que comprende al menos un módulo fotovoltaico según la invención.

La invención se entenderá mejor y otras ventajas de la misma se pondrán de manifiesto tras la siguiente descripción, aportada a modo no limitativo y gracias a las figuras adjuntas, entre las cuales:

- la figura 1 esquematiza un módulo fotovoltaico de la técnica conocida que comprende una célula fotovoltaica y una óptica de concentración;
- 5 - las figuras 2a y 2b ilustran respectivamente una célula fotovoltaica que comprende una estructura multijuntura de materiales apilados y un módulo que integra dicha célula;
- la figura 3 ilustra varias soluciones de concentradores ópticos que funcionan en transmisión, propuestos en la técnica anterior e integrados en módulos fotovoltaicos;
- la figura 4 ilustra una estructura de lente de Fresnel que comprende microprismas;
- 10 - las figuras 5a y 5b ilustran el efecto cromático de una lente de Fresnel difractiva, sobre la eficacia de dicha lente para dos posiciones diferentes de la lente con respecto a la célula;
- la figura 6 ilustra varias soluciones de concentradores ópticos que funcionan en reflexión, propuestos en la técnica anterior e integrados en módulos fotovoltaicos;
- las figuras 7a, 7b y 7c ilustran las restricciones geométricas relacionadas con la dimensión angular del sol θ_s y el ángulo de aceptación α del dispositivo, según tres configuraciones diferentes;
- 15 - las figuras 8a, 8b, 8c ilustra una configuración de módulo fotovoltaico para aplicación espacial propuesta en la técnica anterior;
- las figuras 9a y 9b ilustran ejemplos de arquitectura de separación espaciocromática según la técnica conocida;
- la figura 10 esquematiza un módulo fotovoltaico según la invención;
- 20 - la figura 11 esquematiza una variante de la invención que consta de un conjunto de células CV con multijunturas verticales;
- la figura 12 esquematiza una variante de la invención que comprende un conjunto de células CV que comprenden subcélulas elementales dispuestas lateralmente;
- las figuras 13a y 13b ilustran una representación simplificada del efecto de sombreado y la caída de la eficacia de difracción en función del ángulo de desviación en el caso de la óptica de difracción que comprende una red de microprismas;
- 25 - la figura 14 ilustra la eficacia de difracción en el ámbito escalar de una lente en función de la relación entre la longitud de onda de iluminación en la longitud de onda de diseño;
- la figura 15 ilustra el comportamiento espectral de componentes de sublongitud de onda en comparación con el de una lente difractiva convencional en escalera;
- 30 - la figura 16 ilustra el tipo de espectro solar AM 1.5 que corresponde al espectro solar después de cruzar la atmósfera, formando el sol un ángulo de aproximadamente 48° con respecto a su posición cenital;
- la figura 17 ilustra un ejemplo de dispositivo óptico de concentración que comprende una red de sublongitud de onda de tipo de distribuidor;
- 35 - la figura 18 ilustra un ejemplo de dispositivo óptico de concentración usado en una variante del módulo fotovoltaico de la invención;
- la figura 19 ilustra una segunda variante de la invención del módulo fotovoltaico de la invención que integra una función de focalización en una estructura difractiva de sublongitud de onda;
- las figuras 20a y 20b ilustran un ejemplo de un dispositivo óptico de concentración usado en la invención que incluye una función de separación espectral;
- 40 - las figuras 21a y 21b ilustran un ejemplo de dispositivo óptico de concentración usado en la invención que incluye una función de corrección de aberraciones longitudinales;
- la figura 22 ilustra un ejemplo de variación del índice efectivo con el ancho de los motivos, usada en el ejemplo de dispositivo óptico de concentración ilustrado en las figuras 21a y 21b;
- 45 - las figuras 23a, 23b y 23c ilustran un dispositivo óptico de concentración que comprende una estructura difractiva que garantiza una función de focalización y una estructura difractiva que garantiza una función de separación espectral;
- la figura 24 ilustra un dispositivo óptico de concentración que comprende una estructura difractiva única que garantiza una función de focalización y una función de separación espectral.

50 La presente invención se refiere a un módulo fotovoltaico que comprende al menos una célula fotovoltaica y un dispositivo óptico de concentración que comprende una estructura que consta de motivos de sublongitud de onda, definidos en un material denominado estructurado, cuya al menos una dimensión de dichos motivos es inferior a dicha longitud de onda promedio de iluminación (λ_c) dividida por el índice de refracción de dicho material estructurado, garantizando dicho dispositivo óptico de concentración al menos una función de focalización y una
55 función de difracción.

La función de focalización es garantizada por la óptica refractiva de tipo de lente asociada con una estructura difractiva que comprende los motivos de sublongitud de onda, definidos en un material denominado estructurado, cuya al menos una dimensión de dichos motivos es menor que dicha longitud de onda de iluminación promedio en el espectro de iluminación (λ_c) dividida por el índice de refracción de dicho material estructurado.

60 La figura 10 esquematiza una variante de módulo fotovoltaico de la presente invención CPV_o, que consta de una célula fotovoltaica CV_o y un dispositivo óptico de concentración también llamado concentrador que comprende la estructura difractiva S_{miλ} que comprende motivos de sublongitud de onda, asociada con una estructura refractiva OR_o que presenta una superficie curva. El flujo solar FL_s es capturado por la célula fotovoltaica compuesta por

multijunturas verticales.

La figura 11 esquematiza una variante de módulo fotovoltaico de la presente invención que consta de un conjunto de células fotovoltaicas, acopladas a un conjunto de dispositivos ópticos de concentración, comprendiendo dichas células comprenden ventajosamente estructuras multijunturas verticales descritas previamente y constituidas, por ejemplo, de 3 materiales sensibles en diferentes bandas de longitudes de onda.

De manera más precisa, cada célula CVi consta de un apilamiento de tres materiales sensibles en bandas de diferentes longitudes de onda, M1, M2 y M3 respectivamente sensibles en las bandas de longitudes de onda $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$ y $\Delta\lambda_3$. El dispositivo óptico de concentración comprende un conjunto de microlentes L₁, L₂, L₃, L₄ y un conjunto de estructuras de motivos de sublongitudes de onda Sm_{1λ}, Sm_{2λ}, Sm_{3λ}, Sm_{4λ}.

La figura 12 esquematiza una variante de módulo fotovoltaico de la presente invención que consta de un conjunto de células fotovoltaicas, acopladas a un conjunto de dispositivos ópticos de concentración, constando cada célula CVi de un conjunto de subcélulas con una sola unión CVij dispuestas lateralmente, comprendiendo cada una de las tres subcélulas mostradas un material sensible en una banda de longitudes de onda diferentes de las otras subcélulas que pertenecen a la misma célula. De manera más precisa, cada célula CVi consta de un conjunto de tres subcélulas (están representadas, tres subcélulas CVi₁, CVi₂, CVi₃) constando de tres materiales fotosensibles en bandas de longitudes de onda diferentes, M1, M2 y M3 respectivamente sensibles en las bandas de longitudes de onda $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$ y $\Delta\lambda_3$. El dispositivo óptico de concentración comprende un conjunto de microlentes L₁, L₂, L₃, L₄ y un conjunto de estructuras asociadas de motivos de sublongitudes de onda Sm_{1λ}, Sm_{2λ}, Sm_{3λ}, Sm_{4λ}.

Los intereses, los rendimientos y las funcionalidades de las ópticas de sublongitud de onda se detallan a continuación. De manera general, las ópticas de sublongitud de onda constituyen una familia de ópticas compuesta por estructuras binarias (realizadas con un solo nivel de enmascaramiento) de tamaño menor que la longitud de onda grabada en un material dieléctrico cuyo principio es basado en la síntesis de material artificial. Generalmente, a partir de una estructura periódica de periodo inferior a la longitud de onda de iluminación promedio del espectro dividido por el índice del material estructurado, es posible sintetizar cualquier distribución de índice efectivo y, por lo tanto, cualquier distribución de fase, controlando el tamaño de las microestructuras. Entre las posibles distribuciones de fase, figura la de un componente difractivo, tal como una red de difracción o una lente de difracción también llamada Fresnel difractiva (basada en la ley de difracción y en los saltos de fase de 2pi o algunos módulos 2pi, al contrario de las lentes de Fresnel con micropismas cuyo principio se basa en la ley de refracción). Estas estructuras tienen propiedades particulares que pueden explotarse para aplicaciones ópticas compactas eficaces, en particular, con alta apertura y/o banda espectral ancha.

Además, debido al control tecnológico local de los tamaños de las estructuras, es posible controlar la energía luminosa difractada dirigida en diferentes direcciones en función de la longitud de onda, dirigida a las diferentes células fotosensibles, sensibles a diferentes regiones del espectro. Más particularmente, es posible aumentar el flujo luminoso que llega a ciertas células fotosensibles que serían menos eficaces, para obtener para las diferentes uniones eficacias casi idénticas y para evitar que la eficacia de la unión más débil limite la corriente para el conjunto de las uniones, relacionado con el montaje en serie. De la misma manera, el diseño del componente hace posible adaptar la superficie de las uniones (diferente ancho de célula) para equilibrar la eficacia de las distintas uniones entre sí para un montaje en serie óptimo.

Desde un punto de vista tecnológico, esta familia de ópticas tiene la ventaja de tener un perfil binario: solo requiere una etapa de litografía, sin alineación de la máscara a diferencia de las ópticas multinivel, lo que reduce su eficacia final. Los perfiles son compatibles con medios de fabricación por volumen, como la nanoimpresión, el moldeo o el relieve en caliente, y muchas otras técnicas, fabricándose el propio maestro con los medios de la industria de los semiconductores (grabado ICP y litografía electrónica).

Estas tecnologías usan ventajosamente materiales ligeros y transparentes en el visible, tales como el polidimetilsiloxano PDMS, el polimetacrilato de metilo PMMA, el policarbonato PC.

Al nivel de los rendimientos, estas ópticas presentan la capacidad de abordar incluso ópticas con una apertura digital alta como se describe en los artículos de: Ph. Lalanne, S. Astilean, P. Chavel, E. Cambarnd H. Launois, "Blazed-binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional échelette gratings". Opt. Lett. 23. 1081 1083 (1998) y de MS.L Lee, Ph Lalanne, J C. Rodier, P Chavel. E Cambril, Y Chen, "Imaging with blazed-binary diffractive elements", Opt. A: Pure Appl. Opt. Vol. 4, S119 (2002).

Son particularmente interesantes por la compacidad de los dispositivos, lo que es difícil en el caso de las ópticas difractivas convencionales, como se muestra en las figuras 13a y 13b, que ilustran respectivamente una representación simplificada del efecto de sombreado por trazado del radio y la caída de la eficacia de difracción en función del ángulo de desviación de una red de difracción (equivalente al medio ángulo de apertura de una lente). La línea de puntos proporciona la caída teórica de la eficacia de difracción teórica de una red de escalera grabado en vidrio (n=1,5).

En realidad, la caída en la eficacia de difracción de las lentes difractivas convencionales con grandes aperturas es aún más importante experimentalmente porque es difícil realizar saltos de 2π con una transición abrupta.

- Además, las ópticas de sublongitud de onda tienen propiedades de dispersión única, lo que permite hacerlas trabajar efectivamente en una banda espectral ancha. Generalmente, al estructurar un material de AsGa, una dispersión del índice de refracción permite alcanzar una variación $\Delta n = 0,36$ en la banda de 8-12 μm en comparación con un valor de 0,02 para un material no estructurado. Gracias a esta propiedad de dispersión del índice efectivo, es posible
- 5 diseñar ópticas difractivas cuya eficacia se mantiene en una banda ancha, como se describe en el artículo de C. Sauvan, Ph. Lalanne, M-S. L. Lee, "Broadband blazing with artificial dielectrics", *Opt. Lett.* 29, 1593-1595 (2004), en la solicitud de patente US 2007/0103782, en el artículo de C. Ribot, PhD Thesis from University of Paris Sud (2008) o en el de M-S. L. Lee, S. Bansropun, O. Huet, S. Cassette, B. Loiseaux, A. P. Wood, C. Sauvan and P. Lalanne, "Sub-wavelength structures for broadband diffractive optics", *ICO 2005*, 0602-34 (2005).
- 10 Esta propiedad es muy interesante para aplicaciones solares para las cuales el espectro es muy amplio, generalmente [380 nm-1600 nm].
- Por ejemplo, diseñando una lente difractiva convencional en escalera a $\lambda_0 = 800$ nm, el intervalo espectral está entonces entre $0,5 \lambda_0$ y $2 \lambda_0$ como se ilustra en la figura 14, que proporciona la eficacia de difracción en el ámbito
- 15 escalar de esta lente en función de la relación de la longitud de onda de iluminación a la longitud de onda de diseño λ/λ_0 . Aunque es posible ajustar la longitud de onda de diseño para equilibrar las pérdidas espectrales, la caída de la eficacia sigue siendo importante.
- Para la comparación, la figura 15 ilustra el comportamiento espectral de componentes de sublongitud de onda en comparación con el de una lente difractiva convencional en escalera. Parece que la ganancia en la banda es significativa. Más precisamente, esta figura ilustra el comportamiento de la eficacia de difracción de una óptica
- 20 difractiva convencional en escalera (líneas discontinuas, curva C_{15a}) y de una óptica de sublongitud de onda (líneas continuas, curva C_{15b}) en función de la longitud de onda de iluminación (siendo λ_0 la longitud de onda de diseño), en el ámbito escalar.
- Por otra parte, con estas ópticas, la capacidad de controlar la fase controlando el tamaño de las estructuras no solo permite sintetizar una óptica optimizada en una o varias longitudes de onda, sino también para ajustar o distribuir
- 25 bajo demanda, la intensidad de las diferentes órdenes de difracción, lo que es útil en el caso de la separación espectral, donde la intensidad luminosa recibida no es la misma dentro del espectro.
- Un ejemplo del espectro solar de tipo AM1.5 se da en la figura 16, correspondiendo el espectro solar AM1.5 al espectro solar después de cruzar la atmósfera, formando el sol un ángulo de aproximadamente 48° con respecto a su posición cenital.
- 30 Un ejemplo de la aplicación de estos componentes es el de la función difractiva en un sistema acromático refractivo/difractivo, para no solo acromatizar la distancia focal (función difractiva), sino también para acromatizar la eficacia de difracción. De este modo, en comparación con una solución refractiva pura (enfoque de la lente de Fresnel refractiva con micropismas), se obtiene un mejor rendimiento relacionado con el plegado del cromatismo longitudinal de la focal sin sufrir pérdidas de la eficacia de difracción de banda ancha de una lente difractiva
- 35 convencional.
- Otro ejemplo en el uso de estas ópticas es la separación espectral. Pueden ser usadas como una red en llamas, que usa el orden 0 para el infrarrojo y el orden 1 para el Visible y el cercano IR, como en el enfoque propuesto por el Centro Espacial de Lieja (CSL) y descrito en el artículo de: C. Michel y col., "Study of solar concentrator for space, based on a diffractive/refractive combinaison", *"Renewable Energy and the Environment, OSA, SM2A2 (2012)*.
- 40 Uno de los intereses de la solución de la presente invención reside, por lo tanto, en una mayor eficacia de difracción espectralmente, sin afectar la eficacia en la longitud de onda de diseño (es decir, teniendo la mejor eficacia) o en la longitud de onda promedio, incluso en presencia de un sistema compacto con un ángulo de desviación de orden 1 mayor (generalmente en el caso de una concentración $\times 10$ y una distancia focal de 5 mm), lo que no es el caso de una red de escalera convencional.
- 45 En una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración puede comprender una red de sublongitud de onda de tipo "distribuidor", por lo que la elección de los tamaños de estructura de sublongitud de onda que lo constituyen permite hacer la ingeniería de los ángulos y órdenes de difracción para distribuir/repartir la energía espacial y espectralmente en células de unión simple dispuestas lateralmente.
- En una variante de la invención, las células de unión simple dispuestas lateralmente pueden o no estar al mismo
- 50 nivel horizontalmente.
- En una variante de la invención, las células simples de unión dispuestas lateralmente pueden o no ser del mismo tamaño.
- Los estudios han demostrado la capacidad de los componentes de sublongitud de onda de tipo "distribuidor" para
- 55 separar lateralmente diferentes órdenes de difracción con eficacias controladas para la aplicación de divisor de rayo, como se describe en el artículo de G. Bloom, Ch. Larat, E. Lallier, M-SL. Lee-Bouhours, B. Loiseaux, J-P. Huignard, "Design and optimization of a high efficiency array generator in the mid-IR with binary subwavelength grooves", *Appl.*

Opt. 50,701-709 (2011) y la tesis de Guillaume Bloom: "Combinaison cohérente de lasers à cascade quantique" presentada el 14 de febrero de 2012, Université PARIS XI ORSAY. La figura 17 ilustra un ejemplo de red de sublongitud de onda de tipo "distribuidor" que hace posible crear varias órdenes de difracción con energías controladas. En el caso de los documentos citados, la red estaba destinada a producir órdenes difractados con energías casi iguales, pero este concepto también se aplica para producir órdenes de difracción con la distribución de energía deseada de según las órdenes de difracción.

La solución de la presente invención es particularmente interesante para aplicaciones espaciales. En efecto, el dispositivo de la invención es un sistema estático, que no requiere de etapa de despliegue de los concentradores (detallada anteriormente en una solución de la técnica anterior) y sigue siendo compatible con un sistema de seguimiento para satélites (generalmente del orden de 3° para una longitud focal de 5 mm, para una tasa de concentración de 12) Al proponer una solución compacta, también es posible reducir el volumen de los paneles y simplificar la solución y los medios de prueba en tierra que se implementarán antes del lanzamiento del satélite.

Por otra parte, el dispositivo de la invención se basa en el uso de ópticas de sublongitud de ondas que pueden realizarse en materiales ligeros que permiten sintetizar ópticas planas eficaces a una distancia focal más corta.

La solución también se puede combinar con una técnica de separación espectral, para aumentar la eficacia de la conversión celular.

El solicitante ha resuelto de este modo los siguientes problemas:

- tener un sistema compacto, así como una corta distancia de focalización, generalmente, inferior a un centímetro hasta unos pocos milímetros, por ejemplo, o menos, y componentes voluminosos;
- combinar una función de focalización y una función de corrección de cromatismo;
- garantizar una buena eficacia del concentrador en todo el espectro abordado, proponiendo asociar una función de focalización con una distancia focal muy baja, con una función difractiva con menor apertura digital que el componente refractivo.

Las diferentes funciones proporcionadas por los diferentes elementos de la arquitectura son:

- una compacidad mediante el uso de microlentes y ópticas de sublongitud de onda;
- una mejor eficacia óptica de concentración en la célula fotovoltaica por la combinación refractiva-difractiva, lo que permite una mejor acromatización longitudinal mediante la compensación de la diferencia entre $f(\lambda_m)$ y $f(\lambda_M)$. A título de ejemplo, una diferencia inicial de $\sim 350 \mu\text{m}$ aproximadamente entre $f(\lambda_m=350 \text{ nm})$ y $f(\lambda_M=1400 \text{ nm})$, para un sistema abierto en $f/D=1$, y $f=5 \text{ mm}$, se reduce a casi 0 entre estas dos longitudes de onda gracias a la acromatización longitudinal. Más precisamente dentro del intervalo $[\lambda_m; \lambda_M]$ la variación de la focal se reduce en al menos un factor 3.
- una mejor eficacia espectral al explotar las propiedades de banda ancha de las ópticas de sublongitud de onda.

Según una variante de la invención, y esto para obtener un sistema aún más compacto, el dispositivo óptico de concentración puede comprender un sistema de tipo de lente de Fresnel refractivo con microprismas, combinado con una lente difractiva de sublongitud de onda, como se ilustra en la figura 18.

Según este ejemplo, el concentrador híbrido refractivo/difractivo comprende de este modo un componente refractivo compuesto por microprismas y un componente difractivo compuesto por estructuras de sublongitud de onda.

Ventajosamente, esta solución de concentración se puede combinar con una técnica de separación espectral, cuya función también se puede integrar en la cara difractiva al mismo tiempo que la función de corrección del cromatismo longitudinal. El principio consiste en separar lateralmente los diferentes puntos de focalización en función de la longitud de onda del espectro solar con ayuda de una función de red, integrada en el componente difractivo, usando simples uniones de material distribuidas lateralmente y sensibles en diferentes bandas de longitudes de onda, como se describió anteriormente. La ventaja de la estructura de sublongitud de onda para la implementación de la función de separación espectral es la posibilidad de ajustar la energía dirigida en cada una de las uniones distribuidas lateralmente y permitir superficies de unión sustancialmente diferentes, para una mejor eficacia del montaje en serie, manteniendo una buena eficacia de difracción en todo el espectro.

Según una variante de la invención, el módulo fotovoltaico puede comprender un dispositivo óptico de concentración que asegura una función de focalización, tal como se ilustra en la figura 19, un conjunto de células CVi, que puede constar de subconjuntos de células CVij (CVi₁, CVi₂, CVi₃ representadas), tales como las que se describen en la primera variante de la invención.

Según una variante de la invención, el módulo fotovoltaico puede comprender un dispositivo óptico de concentración que asegura una función de focalización y una función de separación espectral, tal como se ilustra en las figuras 20a y 20b. El dispositivo óptico de concentración sintetiza la función de focalización y la función de separación espectral lateral, permitiendo, de este modo, obtener un sistema muy compacto.

El dispositivo óptico presenta una tasa de concentración C (que puede ser igual a 12, C=12), definida como el

diámetro del dispositivo de concentración dividido por el ancho de la célula.

Suponiendo el uso de $Número_{célula}$ de subcélulas elementales acopladas al dispositivo óptico de concentración, sensibles a diferentes regiones del espectro solar, yuxtapuestas unas junto a las otras por lote, y el ancho de la célula, el periodo de la red viene dado por la relación,

$$\Lambda = \frac{\lambda_{Max} - \lambda_{min}}{2 \operatorname{sen} \left(a \tan \left(\frac{Número_{célula} \cdot D}{2f \cdot C} \right) \right)}$$

Para un componente diseñado en su orden 1 de difracción, el período depende solo de la relación f/D y la tasa de concentración y el número de "vías" espectrales o de subcélulas elementales por concentrador.

La siguiente tabla da ejemplos de estructuras, asumiendo que $Número_{célula}=3$ y proporciona valores de períodos expresados en micrones, pudiendo usar una lente de sílice abierta en f/D=1 (focal/diámetro), por ejemplo, con un diámetro de aproximadamente 5 mm.

C	f/D	Λ
9	1	3
9	0,5	1,6
12	1	4
12	0,5	2,1
20	1	6,7
20	0,5	3,4

Los motivos de la estructura de difracción presentan anchos comprendidos entre 0 y 240 nm y alturas de 2 micrones.

Según una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración usado en la presente invención también puede garantizar una función de correcciones de aberraciones longitudinales.

Tal componente se ilustra en las figuras 21a y 21b y presenta una zona central Z_c y zonas externas, solo la más exterior, referenciada Z_N , se referencia en las figuras.

La altura de los motivos h_2' se define a continuación $h_2' = \frac{\lambda_0}{n_{Max}(\lambda_0) - n_{min}(\lambda_0)}$, donde $n_{Max}(\lambda_0)$ y $n_{min}(\lambda_0)$ corresponden a los índices efectivos para una estructura difractiva compuesta por motivos de sublongitud de onda para un componente que funciona en su orden 1 de difracción.

Por lo general, $n_{Max}(\lambda_0) - n_{min}(\lambda_0)$ puede ser igual a aproximadamente 0,5 para un material de tipo sílice ($n \sim 1,5$), y 1 para un nitruro de silicio ($n \sim 2$).

Estos valores se calculan mediante un procedimiento para resolver el problema de difracción en una estructura periódica infinita, denominado procedimiento modal de Fourier o RCWA (Rigorous Coupled-Wave Analysis). Más particularmente, el índice efectivo en la estructura periódica viene dado por el índice efectivo del modo Bloch que se propaga en la estructura de sublongitud de onda.

A título de ejemplo, la figura 22 da los índices efectivos de una estructura periódica de sublongitud de onda compuesta por pilares de sección cuadrada, de período de 350 nm en función del ancho de los pilares, para pilares grabados en nitruro de silicio o en sílice, para iluminación a 800 nm. La curva C_{22a} es relativa al nitruro de silicio, siendo la curva C_{22b} relativa a la sílice.

El número de zonas es dado por:

$$N = \operatorname{piso} \left(\frac{D^2}{8f d_2 \cdot \lambda_0} \right),$$

donde "piso" es la función "escalera", es decir, que piso (x) corresponde al entero inferior o igual a x.

El radio de la zona central es igual a:

$$r_1 = \sqrt{2 \cdot f d_2 \cdot \lambda_0}.$$

El ancho de la zona n es dado por n, comprendido entre 2 y N (el número máximo de zonas):

$$\operatorname{ancho}^n = r_n - r_{n-1} = \sqrt{2 \cdot f d_2 \cdot \lambda_0} \cdot (\sqrt{n} - \sqrt{n-1})$$

o bien para la última zona

$$\text{ancho}^n = r_N - r_{N-1} = \sqrt{2 \cdot f d_2 \cdot \lambda_0} \cdot (\sqrt{N} - \sqrt{N-1})$$

donde $f d_2$ representa la focal del componente difractivo y depende de las constringencias v_1 , y v_2 , respectivamente del componente refractivo y difractivo que constituye la lente deseada de focal f que constituye el concentrador.

- 5 Las constringencias v_1 y v_2 dependen esencialmente del material que constituye el componente difractivo, así como de las longitudes de onda elegidas por definición en la banda considerada, aquí, $\lambda_{\min}=400$ nm, $\lambda_{\max}=1400$ nm:

$$v_2 = \frac{\lambda_0}{\lambda_{\min} - \lambda_{\max}}, \quad f d_2 = -f \cdot \frac{v_1 - v_2}{v_2},$$

$$v_1 = \frac{n(\lambda_0) - 1}{n(\lambda_{\min}) - n(\lambda_{\max})}$$

λ	$\lambda_{\min}=400$ nm	$\lambda_0=800$ nm	$\lambda_{\max}=1400$ nm	400 nm-1400 nm	
	$n(\lambda_{\min})$	$n(\lambda_0)$	$n(\lambda_{\max})$	v_1	v_2
sílice	1,4701	1,4533	1,4458	18,6543	-0,8000
Nitruro de silicio	2,0739	2,0102	1,9924	12,3924	-0,8000

- 10 La lente refractiva del concentrador se define por su focal $f d_1$ dada por:

$$f d_1 = f \cdot \frac{v_1 - v_2}{v_1}$$

A título de ejemplo, considerando una lente de sílice abierta en $f/D=1$ (focal/diámetro), unos 5 mm de diámetro aproximadamente, usado para una tasa de concentración $\times 12$. La lente difractiva para reducir la aberración cromática longitudinal puede estar compuesta por diferentes zonas de Fresnel difractivas con una altura generalmente de aproximadamente 2 μm para usar en su orden 1 de difracción. La zona central es un disco con un radio de 441 μm y la zona más externa es un anillo de 39 μm de ancho.

Los motivos de la estructura de difracción presentan anchos comprendidos entre 0 y 240 nm y alturas de 2 micrones.

Según una variante de la invención, el dispositivo óptico de concentración puede comprender dos estructuras difractivas en cada una de sus caras, incluida una estructura difractiva para proporcionar una función de focalización y una estructura difractiva que garantiza una función de separación espectral.

Las figuras 23a, 23b y 23c ilustran, de este modo, un ejemplo de configuración compuesto por una lente difractiva de focalización que se encuentra en una cara y una red de difracción para la separación espectral que se encuentra en la segunda cara.

La figura 23a proporciona una vista simplificada de una sección del componente según su diámetro con una primera estructura difractiva S_{D1} para la focalización y una segunda estructura difractiva S_{D2} para la separación espectral.

La figura 23b muestra una vista desde arriba del componente, representando los niveles de gris una variación de índice efectiva codificada por motivos de sublongitud de onda. Las regiones más oscuras corresponden a niveles de índice efectivo más altos. Las zonas más claras corresponden a niveles de índice efectivo más bajos.

La figura 23c muestra una vista desde abajo del componente, representando los niveles de gris una variación de índice efectiva codificada por motivos de sublongitud de onda.

En este ejemplo, el concentrador está compuesto por una lente difractiva y una red de difracción. Estos dos elementos se encuentran en cada lado de un componente único que sirve tanto como concentrador como separador espectral. Cada función se realiza con ayuda de motivos de sublongitud de onda. El cálculo de la lente difractiva, que sirve como función de focalización, es diferente del de la lente que sirve para reducir las aberraciones cromáticas longitudinales, por su focal. Una focal típica es de 5 mm para una función de focalización. Basándose en las ecuaciones anteriores, y considerando una lente de sílice abierta en $f/D=1$ (focal/diámetro), unos 5 mm de diámetro aproximadamente, la lente difractiva que permite realizar la función de focalización está compuesta por diferentes zonas de Fresnel difractivas con una altura general de aproximadamente 2 μm para usar en su orden 1 de difracción. La zona central es un disco con un radio de 89 μm y la zona más externa es un anillo de 1,6 μm de ancho. Las diferentes zonas están compuestas por motivos de sublongitud de onda.

Los motivos de la estructura de difracción presentan anchos comprendidos entre 0 y 240 nm y alturas de 2 micrones.

El uso de una óptica toda difractiva de sublongitud de onda sola puede permitir realizar la función de focalización, a pesar de una fuerte apertura $f/1$, en un sistema muy compacto, generalmente 5 mm, o bien, generalmente 16 veces más compacto que el dispositivo presentado anteriormente por la empresa Entech.

- 5 Según una variante de la invención, el dispositivo de concentración puede comprender una estructura difractiva única en la que las dos funciones pueden combinarse e implementarse en una sola cara del componente llamado cara inferior orientado hacia la célula fotovoltaica, siendo la cara opuesta llamada inferior plana. La figura 24 ilustra de este modo la vista inferior de tal dispositivo de concentración. Representando los niveles de gris una variación de índice efectiva codificada por motivos de sublongitud de onda. Las regiones más oscuras corresponden a niveles de índice efectivo más altos. Las zonas más claras corresponden a niveles de índice efectivos más bajos (se debe tener en cuenta que para mayor claridad de esta figura y de las anteriores, estas cifras no están a escala, no muestran el número exacto de anillos, siendo este número en este caso más alto).
- 10

REIVINDICACIONES

- 5 1. Módulo fotovoltaico que comprende al menos una célula fotovoltaica (CV) y al menos un dispositivo óptico de concentración (O_c), destinado a ser iluminado por un flujo luminoso que emite en varias longitudes de onda de iluminación (λ_i) que pertenece a una banda de longitudes de onda definida por una longitud de onda mínima (λ_{\min}) y una longitud de onda máxima (λ_{\max}), siendo dicha banda de longitudes de onda la de la radiación solar del orden de [380 nm-1600 nm] **caracterizado porque**:
- dicho dispositivo óptico de concentración es un componente monolítico que comprende:
 - en una cara, una estructura difractiva con motivos de dimensiones de sublongitud definidos en un material denominado estructurado, asegurando una función de difracción, teniendo dichos motivos al menos una dimensión inferior o igual a la longitud de onda promedio de iluminación λ_c situada entre λ_{\min} y λ_{\max} dividida por el índice de refracción de dicho material estructurado y estando dichos motivos separados entre sí por distancias de sublongitud de onda, definidas entre centros de motivos adyacentes
 - en la otra cara, una estructura de focalización que comprende una óptica refractiva o una estructura difractiva con motivos de dimensiones de sublongitud definidos en un material denominado estructurado,
 - o
 - dicho dispositivo óptico de concentración es un componente monolítico que comprende una estructura difractiva con motivos de dimensiones de sublongitud definidos en un material denominado estructurado, garantizando en una misma cara una función de focalización y una función de difracción, teniendo dichos motivos al menos una dimensión inferior o igual a la longitud de onda promedio de iluminación λ_c situada entre λ_{\min} y λ_{\max} dividida por el índice de refracción de dicho material estructurado y estando dichos motivos separados entre sí por distancias de sublongitud de onda, definidas entre centros de motivos adyacentes
2. Módulo fotovoltaico según la reivindicación 1, **caracterizado porque** dicha estructura difractiva comprende motivos de sublongitudes de onda que presentan distancias definidas entre centros de motivos adyacentes, periódicos.
- 25 3. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 o 2, **caracterizado porque** el dispositivo óptico de concentración consta de una estructura difractiva que consta de motivos de sublongitud de onda y una óptica refractiva.
- 30 4. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado porque** el dispositivo óptico de concentración comprende dos estructuras difractivas que constan de motivos de sublongitud de onda, definidos en al menos un material denominado estructurado, de las que una garantiza una función de focalización.
5. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque** dicha célula fotovoltaica comprende al menos un material fotosensible en dicha banda de longitudes de onda.
- 35 6. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** dicha célula fotovoltaica comprende un apilamiento de materiales, realizando una estructura multijuntura llamada vertical, siendo cada uno de dichos materiales al menos sensible en una subbanda de longitudes de onda ($\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3, \Delta\lambda_4$) perteneciente a dicha banda de longitudes de onda: $\Delta\lambda = [\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$.
- 40 7. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado porque** dicha célula fotovoltaica comprende un conjunto de subcélulas elementales adyacentes fotovoltaicas en un mismo plano que comprende materiales sensibles en subbandas de longitudes de onda ($\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3, \Delta\lambda_4$), pertenecientes a dicha banda de longitudes de onda: $\Delta\lambda = [\lambda_{\min}; \lambda_{\max}]$, con el fin de constituir una estructura multijuntura denominada horizontal.
8. Módulo fotovoltaico según la reivindicación 7, **caracterizado porque** comprende subconjuntos de células elementales, fotovoltaicas, ubicadas en diferentes planos.
9. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 7 u 8, **caracterizado porque** comprende subcélulas elementales fotovoltaicas que presentan tamaños diferentes las unas con respecto a las otras.
- 45 10. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 3 a 9, tomada en su dependencia con la reivindicación 3, **caracterizado porque** dicha óptica refractiva consta de al menos una lente refractiva de superficie curva.
11. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 3 a 9, tomada en su dependencia con la reivindicación 3, **caracterizado porque** dicha óptica refractiva comprende al menos una lente de Fresnel que consta de un conjunto de microprismas con un tamaño de aproximadamente uno a unas centenas de micrómetros.
- 50 12. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 3 a 11, tomada en su dependencia con la reivindicación 3, **caracterizado porque** la óptica refractiva se realiza del mismo material que el material estructurado que consta de dichos motivos de dimensiones de sublongitud.

13. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 12, **caracterizado porque** los motivos son pilares o agujeros.
- 5 14. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 13, **caracterizado porque** dicho dispositivo de concentración comprende una estructura difractiva con motivos de dimensiones de sublongitud definidos en un material denominado estructurado que presenta una función de corrección de aberración longitudinal y/o una función de separación espectral lateral.
- 10 15. Módulo fotovoltaico según la reivindicación 14, **caracterizado porque** dicho dispositivo de concentración comprende una zona central y unas zonas externas;
- estando cada zona compuesta por motivos de tipo pilares de sección redonda o cuadrada y/o agujeros de sección redonda o cuadrada;
 - variando las dimensiones de dichos motivos de una zona a otra para codificar una variación del índice efectivo y, por lo tanto, una variación de fase, pudiendo dichas variaciones de dimensión ser monótonas o no.
- 15 16. Módulo fotovoltaico según la reivindicación 15, **caracterizado porque** los motivos presentan dimensiones laterales inferiores o iguales a 350 nm y el espaciado entre el centro de dos zonas consecutivas es de aproximadamente 350 nm, estando las alturas de los motivos comprendidas entre 1 micrómetro y una decena de micrómetros.
- 20 17. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 16, **caracterizado porque** dicho material estructurado es un material dieléctrico de tipo sílice, vidrio, nitruro de silicio o de tipo polimérico que puede ser polidimetilsiloxano (PDMS), o polimetacrilato de metilo (PMMA) o policarbonato (PC).
- 25 18. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 17, **caracterizado porque** las dimensiones de los motivos son del orden de 80 nm a 250 nm de ancho o de diámetro y de 1 a 2 μm de altura.
- 30 19. Módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones 1 a 18, **caracterizado porque** comprende un conjunto de células elementales fotovoltaicas.
20. Módulo fotovoltaico según la reivindicación 19, **caracterizado porque** comprende un conjunto de células elementales fotovoltaicas y una estructura que consta de motivos de sublongitud de onda, definidos en un material denominado estructurado, teniendo al menos una dimensión de dichos motivos inferior a dicha longitud de onda promedio de iluminación (λ_c) dividida por el índice de refracción de dicho material estructurado, proporcionando dicha estructura una función de focalización y una función de difracción.
- 35 21. Módulo fotovoltaico según la reivindicación 19, **caracterizado porque** el dispositivo óptico de concentración comprende un conjunto de microlentes, estando cada microlente acoplada a una estructura difractiva que consta de motivos de dimensiones de sublongitud.
22. Módulo fotovoltaico según la reivindicación 19, **caracterizado porque** el dispositivo óptico de concentración comprende un conjunto de lentes Fresnel con microprismas, estando cada lente de Fresnel acoplada a una estructura difractiva que consta de motivos de dimensiones de sublongitud.
23. Panel solar de generador solar para satélite que comprende al menos un módulo fotovoltaico según una de las reivindicaciones precedentes.

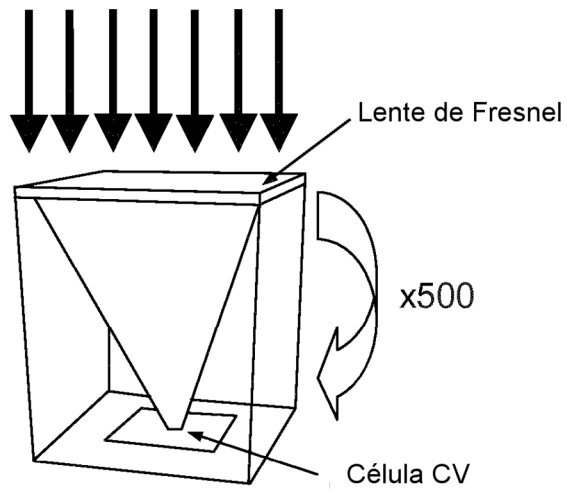


FIG.1

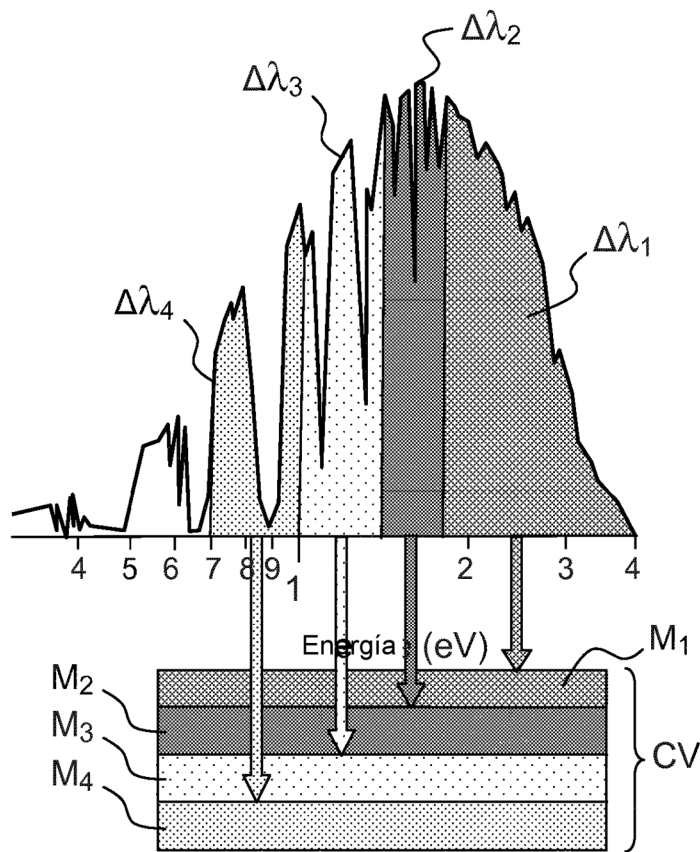


FIG.2a

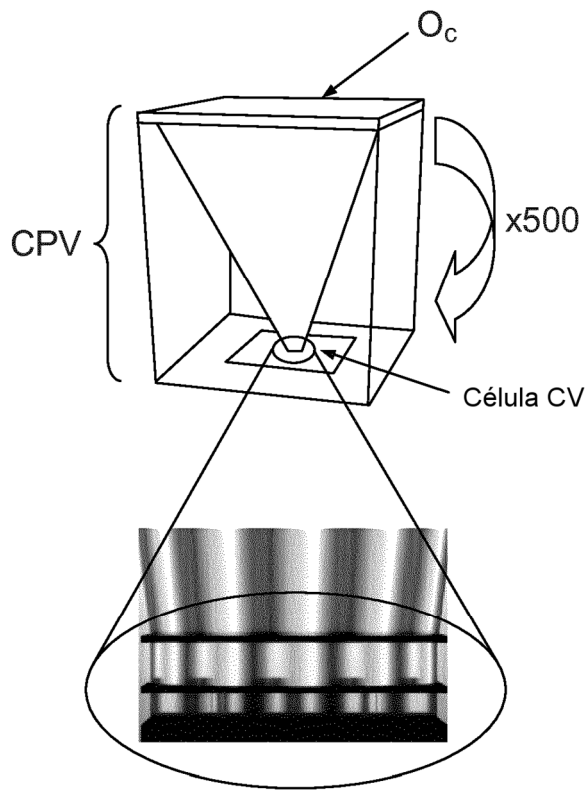


FIG.2b

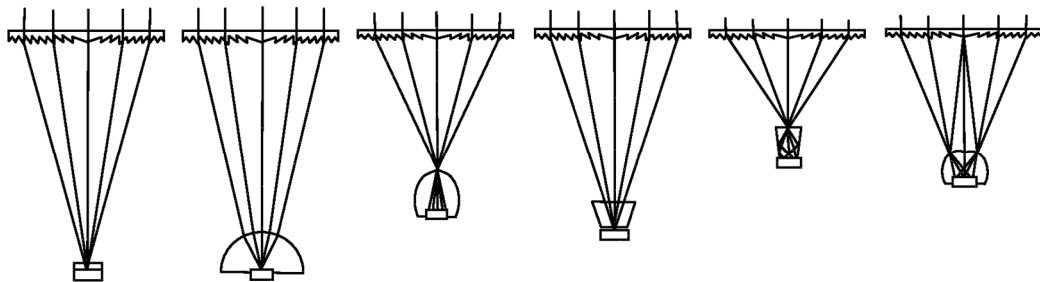


FIG.3

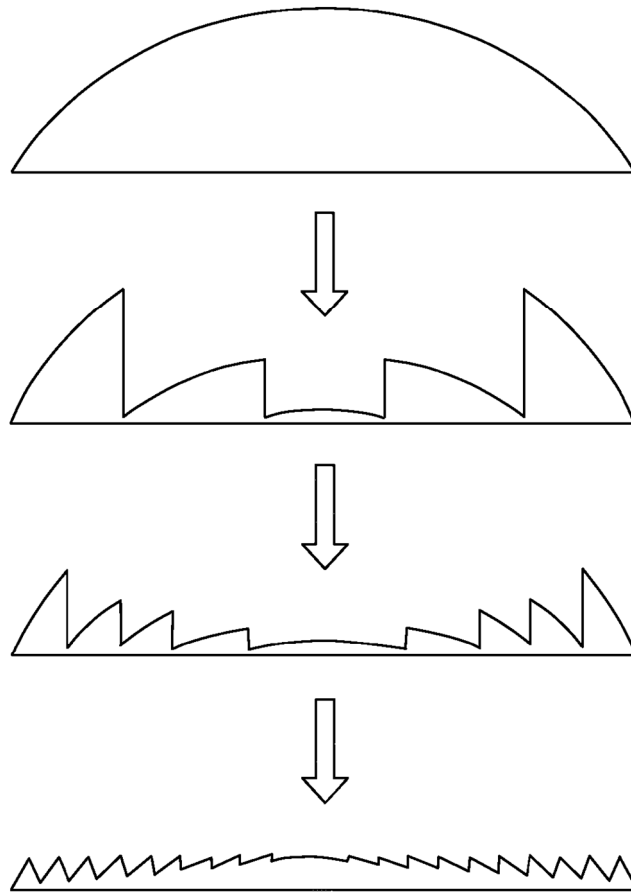


FIG.4

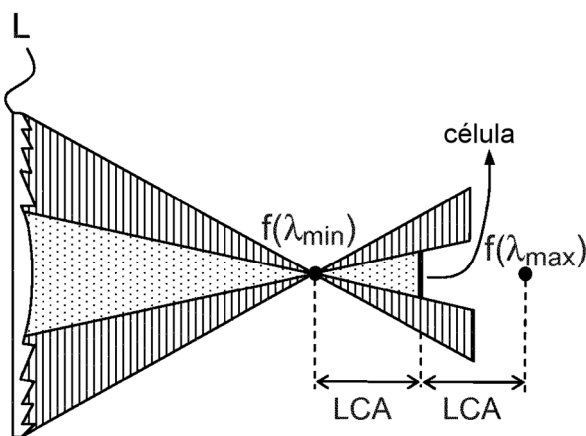


FIG.5a

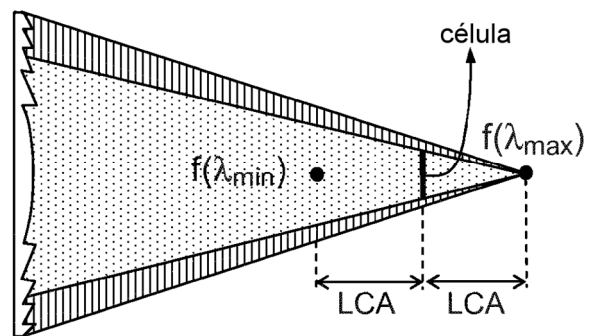


FIG.5b

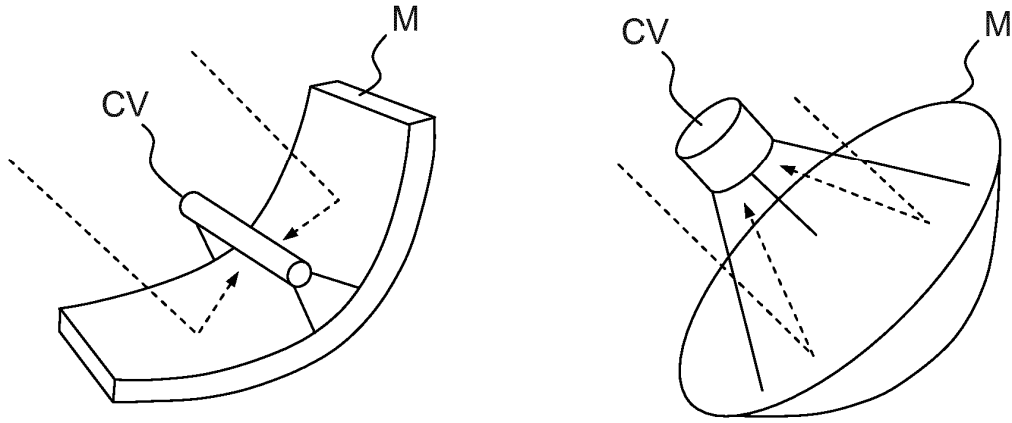


FIG. 6

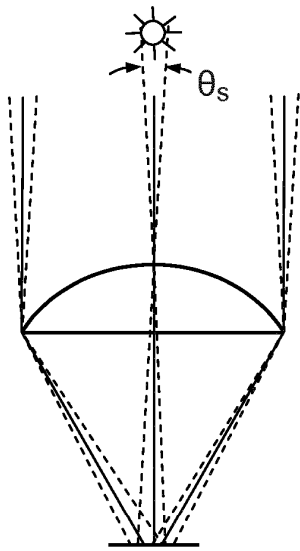


FIG. 7a

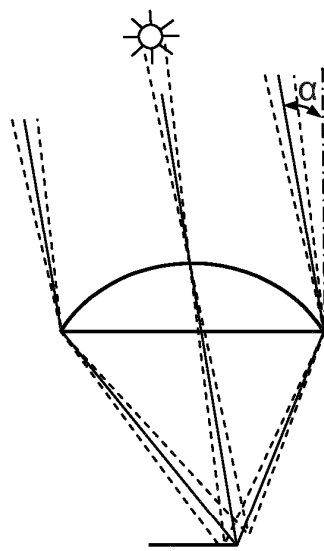


FIG. 7b

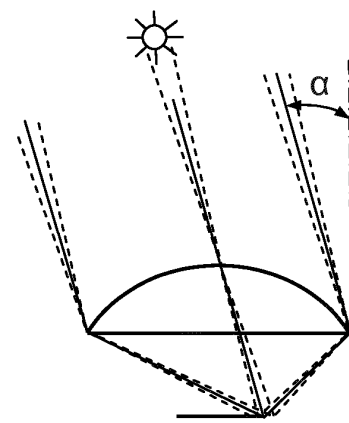


FIG. 7c

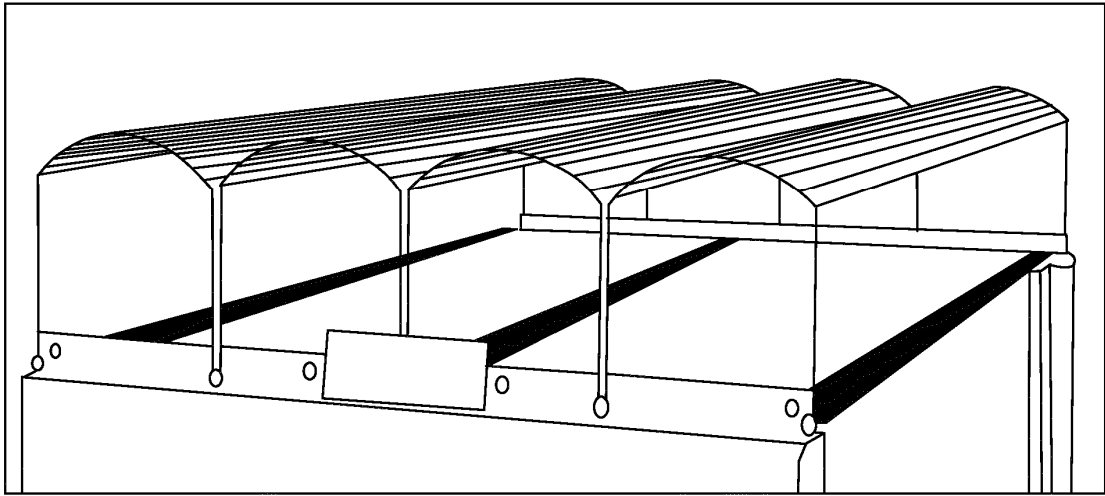


FIG.8a

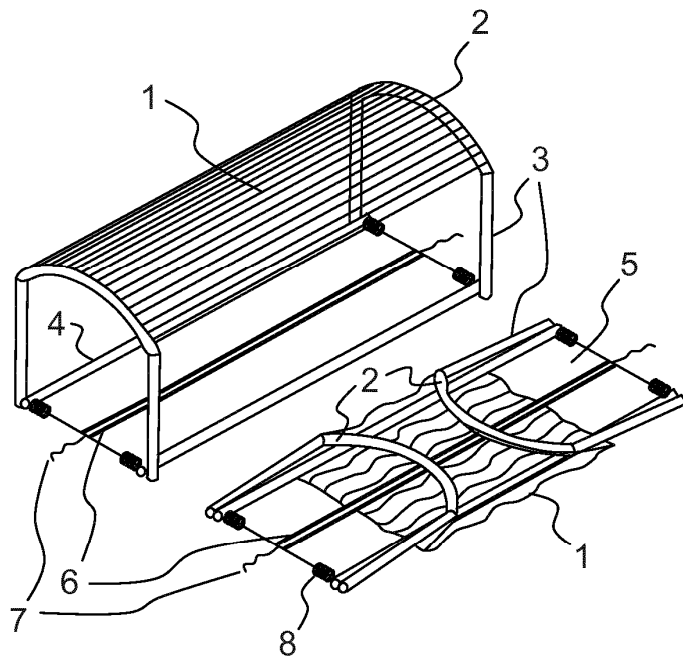


FIG.8b

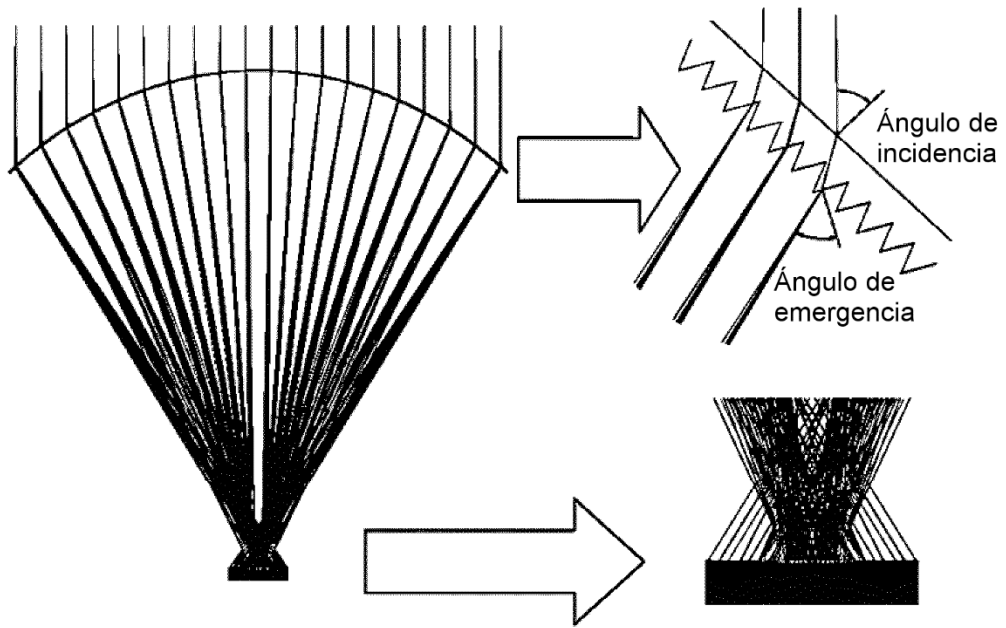


FIG.8c

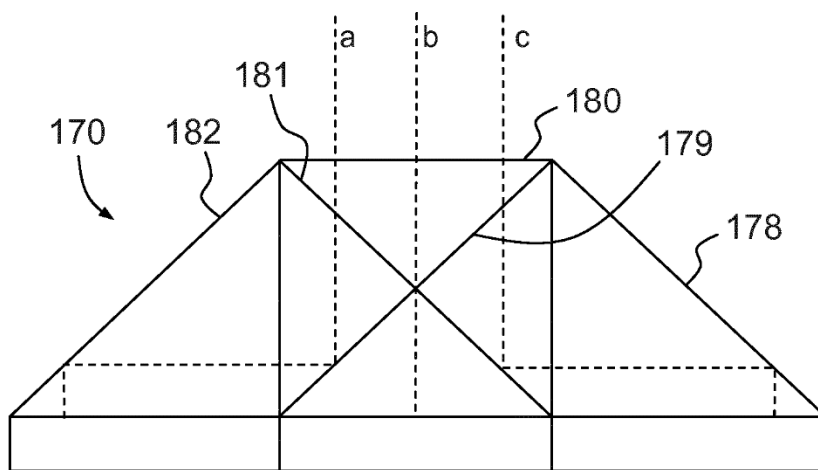


FIG.9a

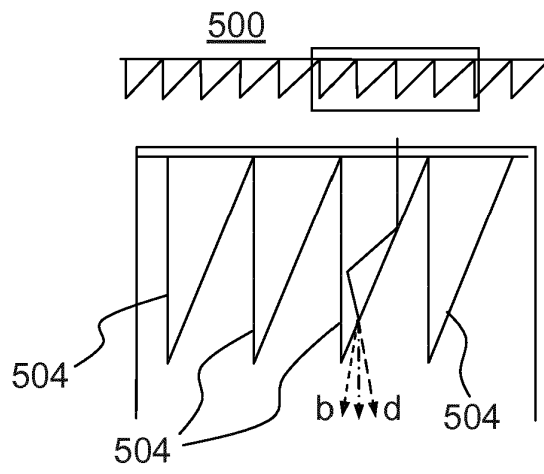


FIG. 9b

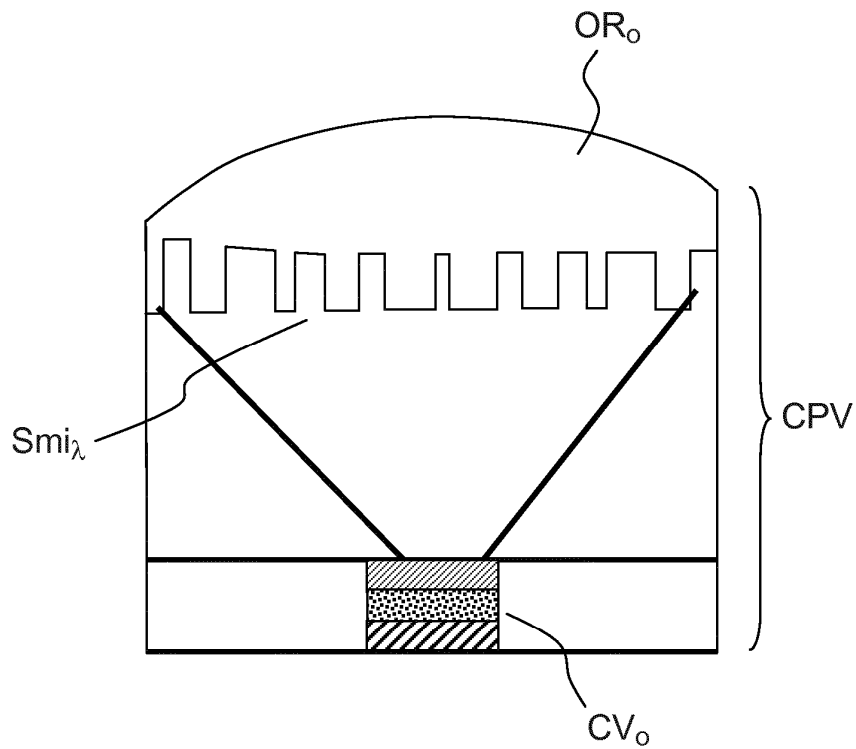


FIG. 10

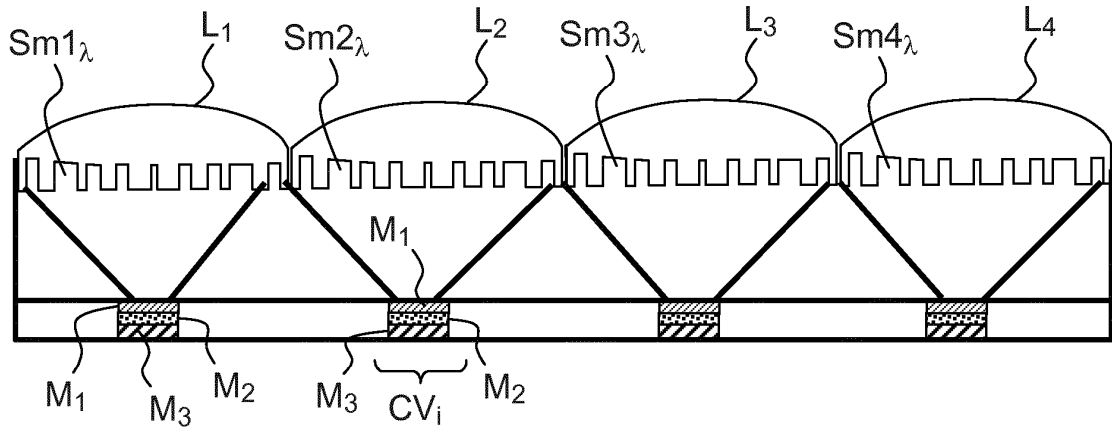


FIG. 11

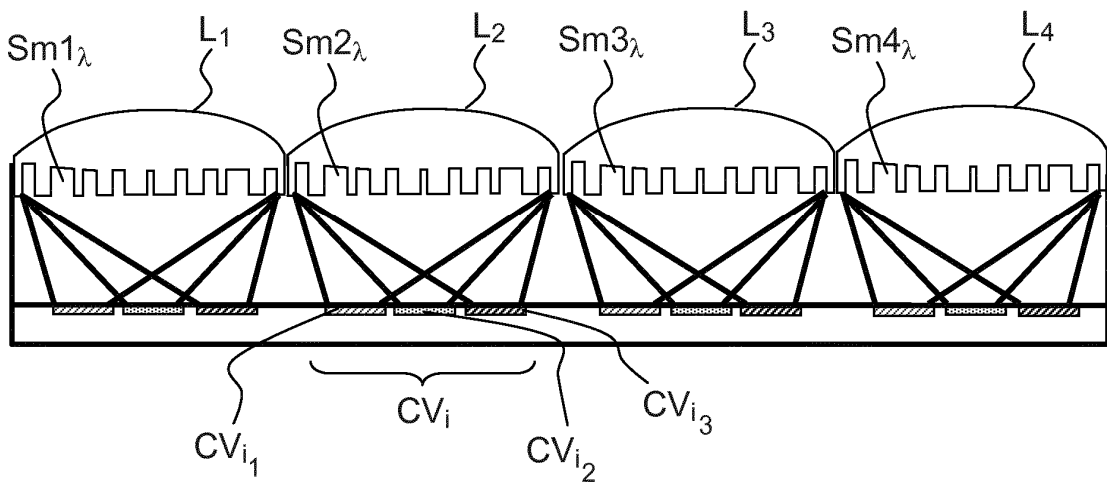


FIG. 12

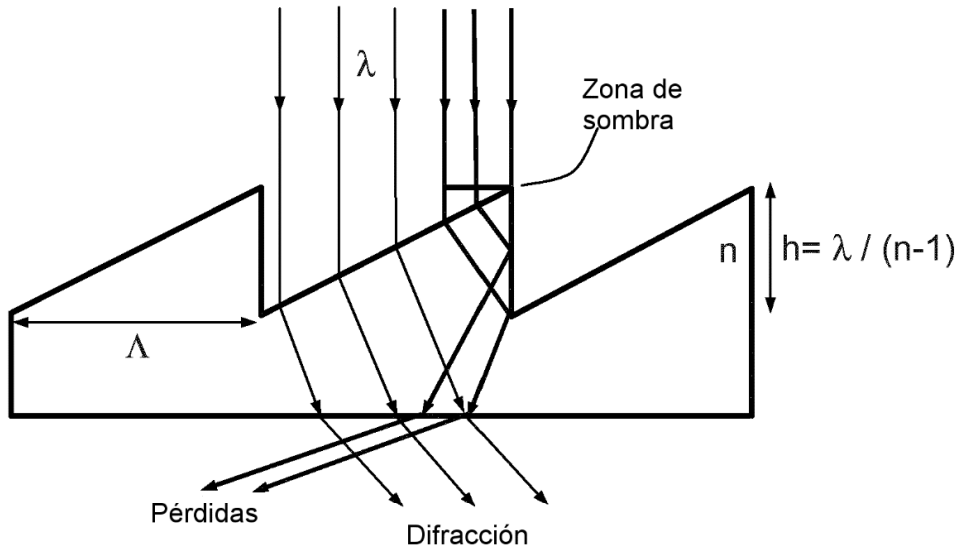


FIG.13a

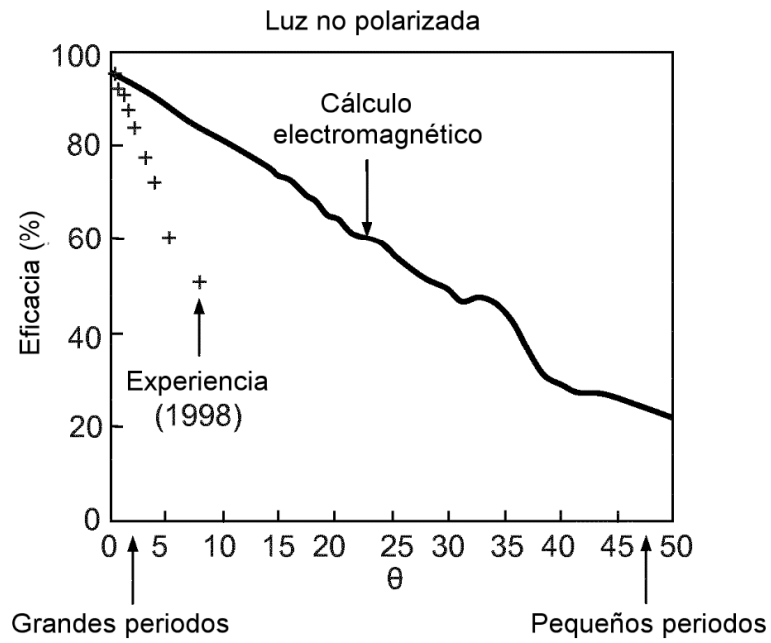


FIG.13b

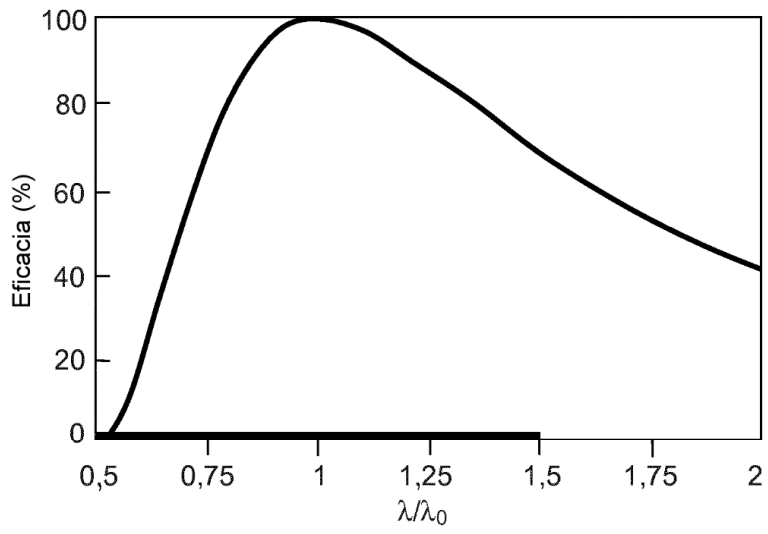


FIG.14

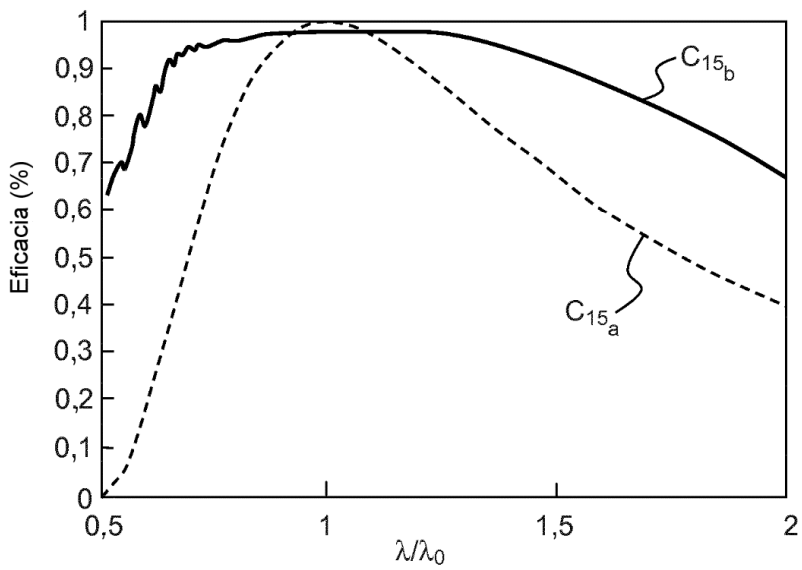


FIG.15

Densidad de potencia espectral del espectro convencional AM1.5

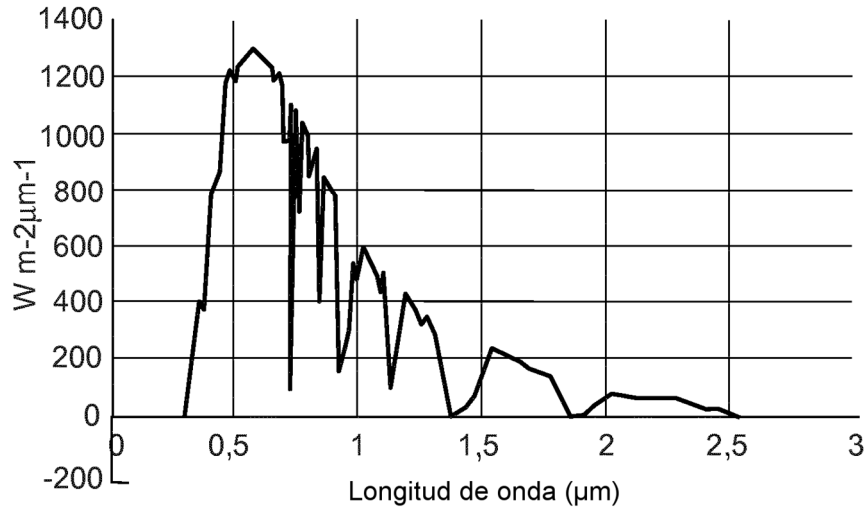


FIG.16

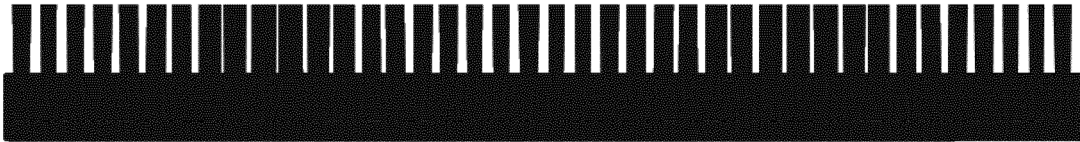


FIG.17



FIG.18

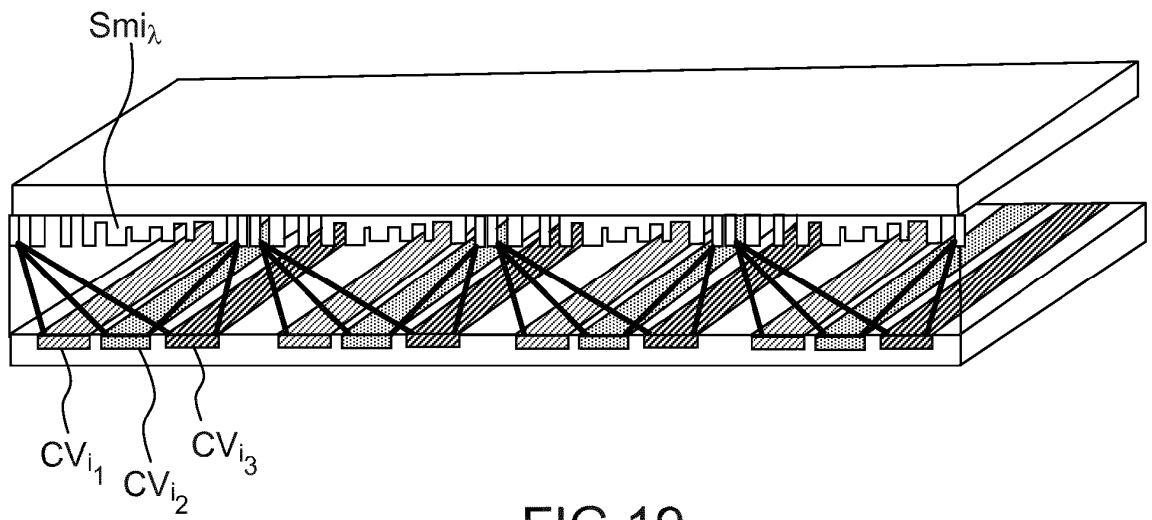


FIG.19

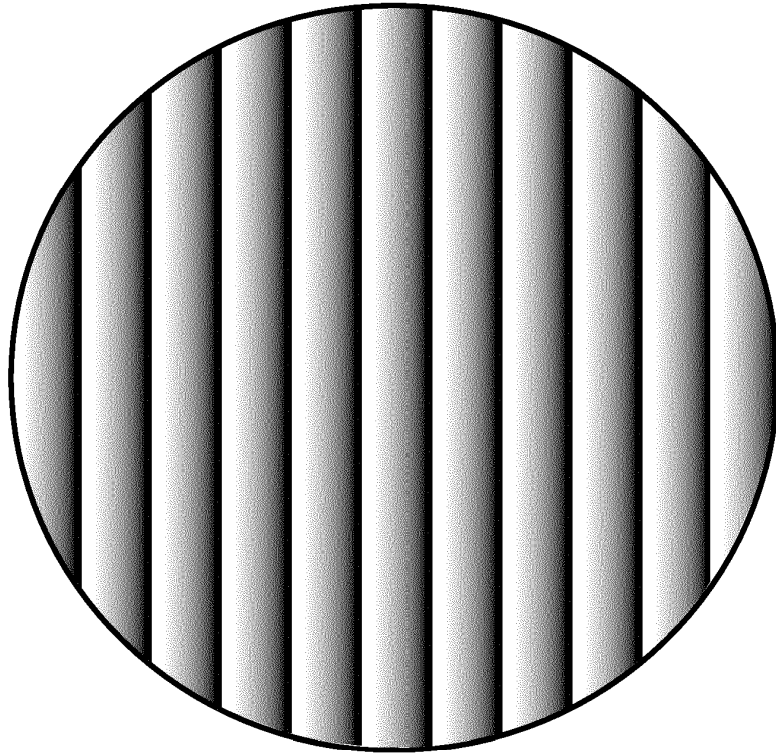


FIG.20a

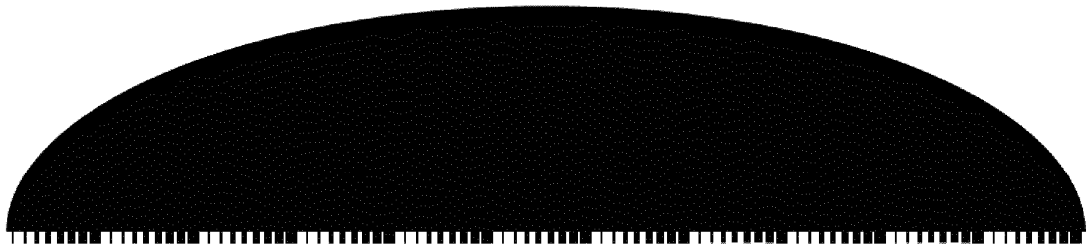


FIG.20b

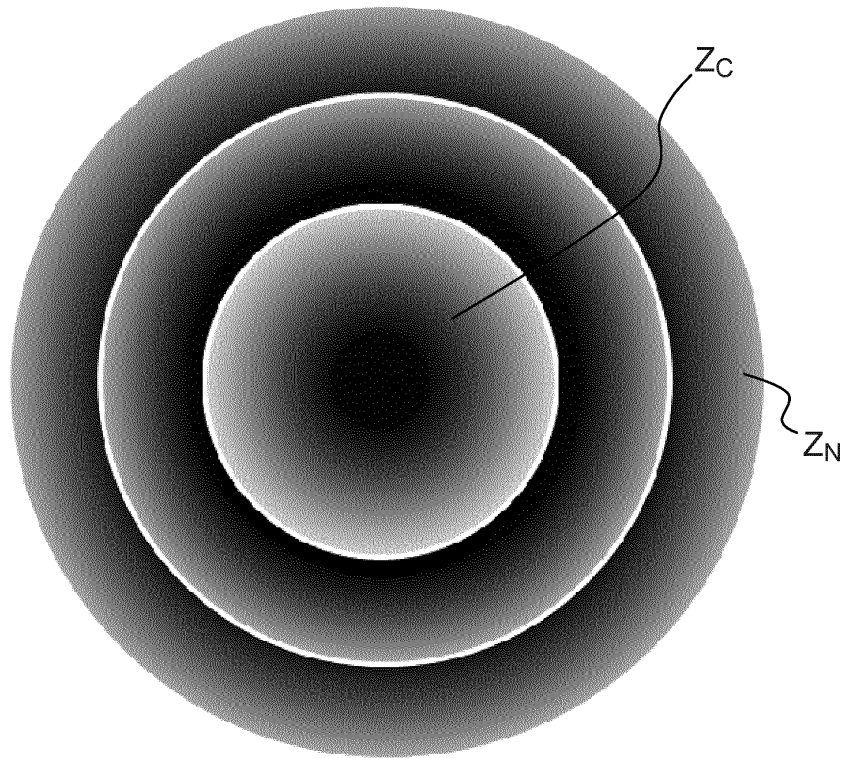


FIG.21a

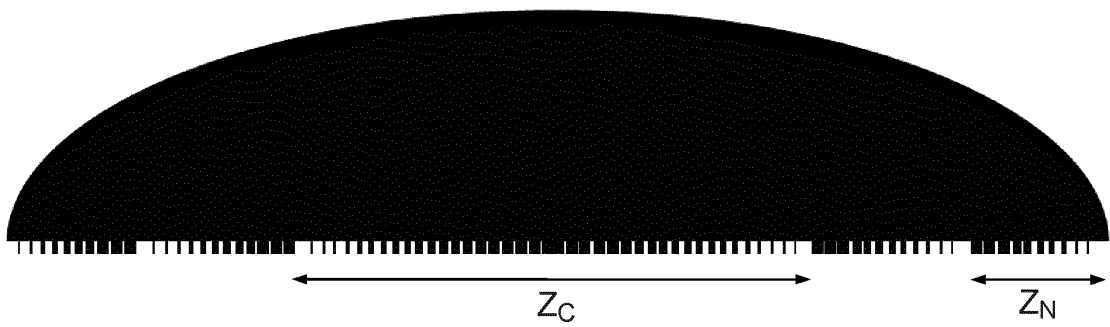


FIG.21b

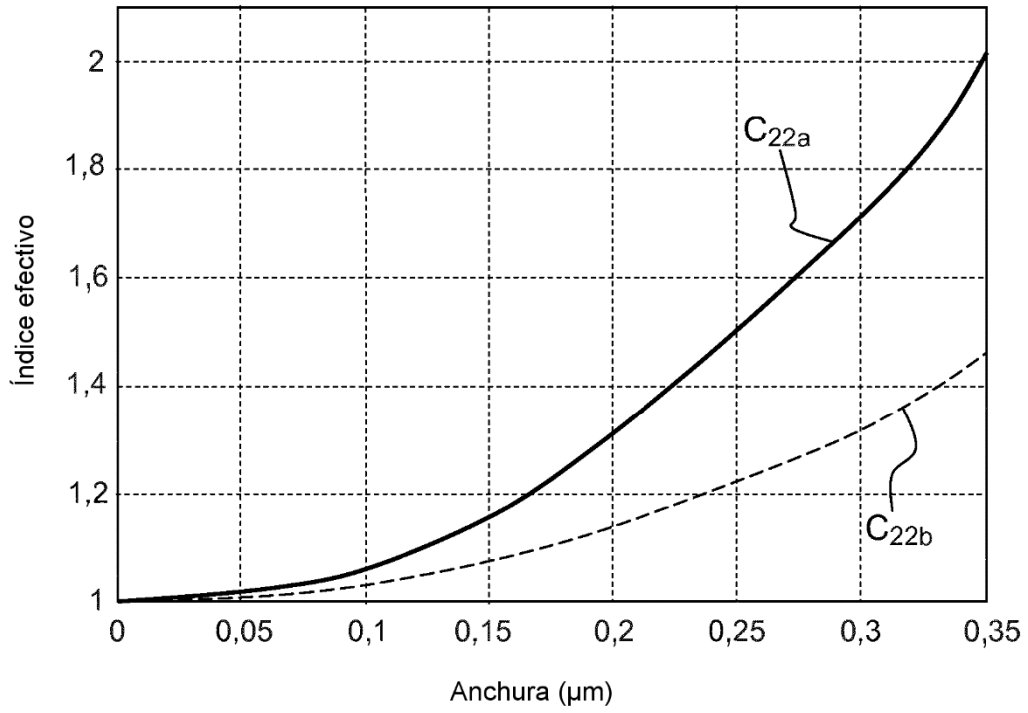


FIG.22



FIG.23a

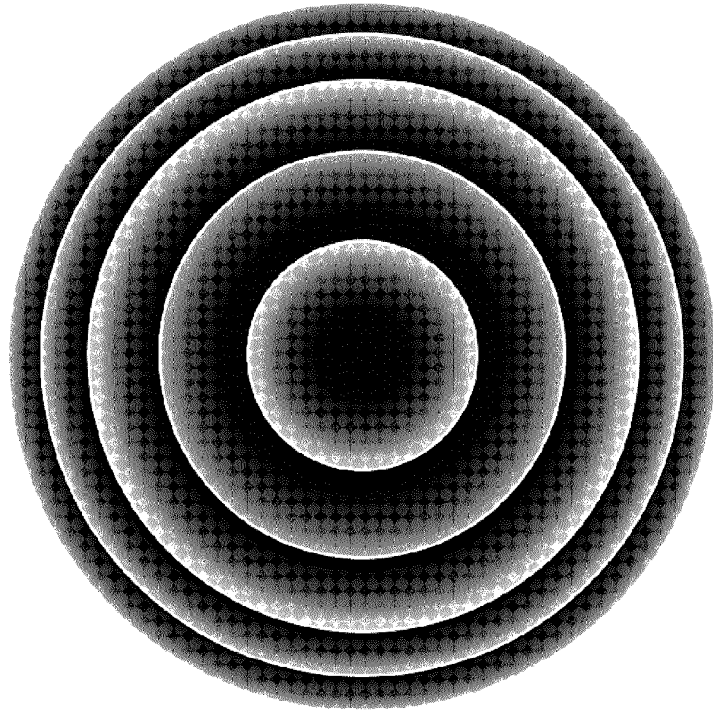


FIG.23b

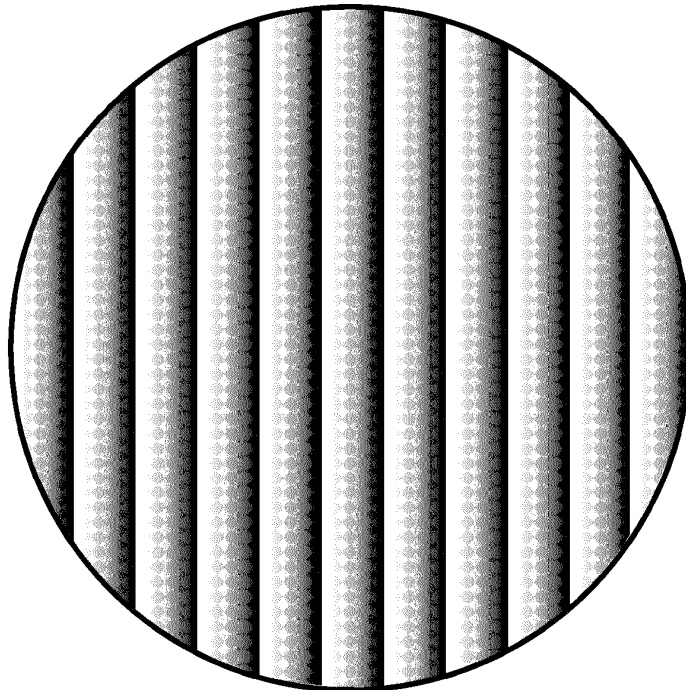


FIG.23c

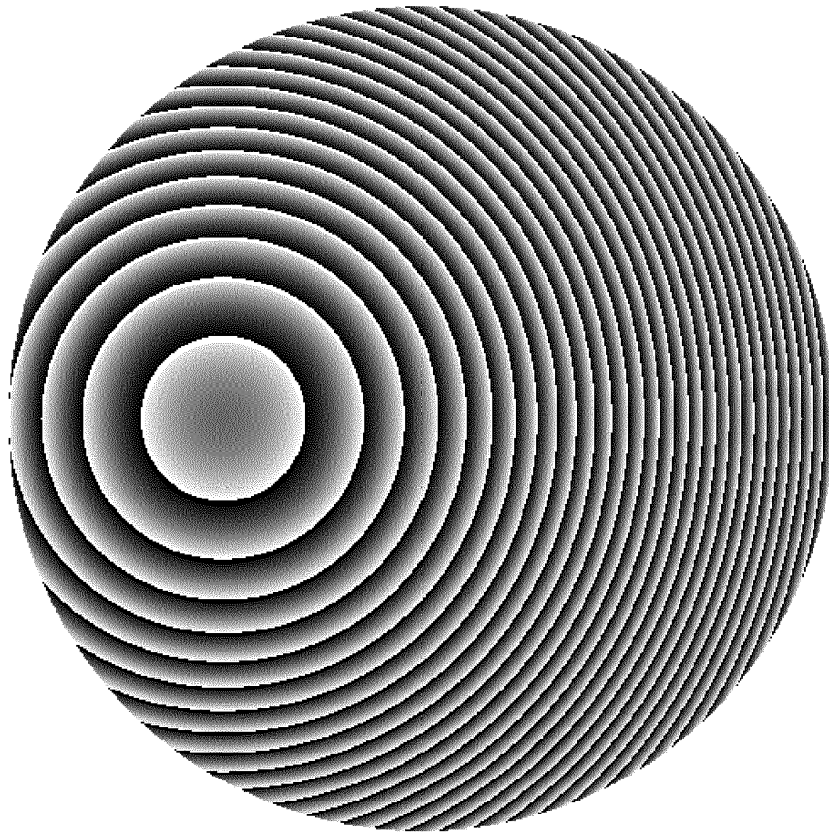


FIG.24