

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 687 944**

51 Int. Cl.:

**G02B 6/02** (2006.01)

**G02B 6/036** (2006.01)

**G02B 6/28** (2006.01)

**G02B 6/028** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.02.2012 PCT/US2012/025344**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.11.2012 WO12154246**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.02.2012 E 12782096 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.08.2018 EP 2684081**

54 Título: **Fibras ópticas con núcleos ópticos tubulares**

30 Prioridad:

**05.03.2011 US 201161464476 P**  
**31.03.2011 US 201113077149**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**30.10.2018**

73 Titular/es:

**ALCATEL LUCENT (100.0%)**  
**Site Nokia Paris Saclay, Route de Villejust**  
**91620 Nozay, FR**

72 Inventor/es:

**WINZER, PETER, J. y**  
**DOERR, CHRISTOPHER, RICHARD**

74 Agente/Representante:

**VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro**

ES 2 687 944 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

Fibras ópticas con núcleos ópticos tubulares

- 5 La presente solicitud reivindica el beneficio de la solicitud provisional de Estados Unidos 61/464.476, titulada "FIBRAS ÓPTICAS CON NÚCLEOS ÓPTICOS TUBULARES" y fue presentada por Christopher Doerr y Peter J. Winzer el 5 de marzo de 2011.

10 **Antecedentes**

**Campo técnico**

Las invenciones se refieren a fibras ópticas y métodos para fabricar y usar fibras ópticas.

15 **Discusión de la técnica relacionada**

Esta sección presenta aspectos que pueden ser útiles para facilitar una mejor comprensión de las invenciones. En consecuencia, las afirmaciones de esta sección deben leerse a este respecto y no deben entenderse como admisiones sobre lo que está en la técnica anterior o lo que no está en la técnica anterior.

- 20 En un sistema de comunicación óptica, una serie de uno o más tramos de fibra óptica normalmente transporta datos desde un transmisor óptico a un receptor óptico. La fibra óptica puede fabricarse de modo que tenga uno o múltiples modos de propagación para la luz que tiene una longitud de onda en las bandas habituales de telecomunicaciones de fibra óptica, por ejemplo, la banda C o la banda L. En una fibra óptica multimodo están disponibles múltiples modos de propagación y cada uno de los modos de propagación puede transportar un flujo de datos diferente o una combinación lineal de diferentes flujos de datos. Por lo tanto, una fibra óptica multimodo puede ser capaz de soportar una velocidad de transmisión de datos en una banda de frecuencias dada más alta que una fibra óptica monomodo. El documento WO 97/35220 describe una fibra multimodo que tiene un núcleo tubular.

30 **Breve resumen**

- Una realización de un primer aparato incluye una fibra óptica para la cual una base ortonormal completa de modos de propagación a una frecuencia de telecomunicación óptica incluye uno de los modos de propagación con diferentes momentos angulares. La fibra óptica tiene un núcleo óptico tubular y un revestimiento óptico externo en contacto con el núcleo óptico tubular y alrededor de él. El núcleo óptico tubular tiene un índice de refracción más grande que el revestimiento óptico. El núcleo óptico tubular está configurado de forma que los modos de propagación con momentos angulares de la magnitud más baja tengan una sola velocidad de grupo, los de los modos de propagación con momentos angulares de la segunda magnitud más baja tengan una sola velocidad de grupo y los de los modos de propagación con momentos angulares de la tercera magnitud más baja tengan una sola velocidad de grupo.

En algunas realizaciones, el primer aparato puede incluir además un revestimiento óptico interno que llena el núcleo óptico tubular y que tiene un índice de refracción más pequeño que el índice de refracción del núcleo óptico tubular.

- 45 En cualquiera de las realizaciones del primer aparato, el núcleo óptico tubular puede tener un índice de refracción que varía radialmente sobre el núcleo óptico tubular.

- En cualquiera de las realizaciones anteriores del primer aparato, el núcleo óptico tubular puede configurarse de modo que para cada magnitud específica de los momentos angulares, los modos de propagación con momentos angulares de la magnitud específica tengan la misma velocidad de grupo.

- 50 En cualquiera de las realizaciones anteriores del primer aparato, el primer aparato puede incluir un divisor o combinador óptico que conecta ópticamente un primer puerto óptico del mismo a N segundos puertos ópticos del mismo, una red óptica plana y N guías de onda ópticas. Por tanto, cada guía de onda óptica tiene un primer extremo situado cerca y conectado ópticamente a un correspondiente de los segundos puertos ópticos y tiene un segundo extremo situado cerca de la red óptica plana. Además, la red óptica plana está configurada para difractar la luz entre un extremo adyacente de la fibra óptica y los segundos extremos de las guías de onda ópticas. En algunas de tales realizaciones, el primer puerto óptico puede acoplarse sustancialmente solo ópticamente a algunos de los modos de propagación, en el que algunos de los modos de propagación tienen momentos angulares del mismo valor. En algunas de tales realizaciones, al menos el 90 % de la potencia óptica comunicada entre el primer puerto óptico y la fibra óptica se comunica entre el primer puerto óptico y algunos de los modos de propagación.

- 65 Un segundo aparato incluye una fibra óptica para la cual una base ortonormal completa de modos de propagación en una frecuencia de telecomunicación óptica incluye uno de los modos de propagación con diferentes momentos angulares. La fibra óptica tiene un núcleo óptico tubular y un revestimiento óptico externo en contacto con el núcleo óptico tubular y alrededor de él. El núcleo óptico tubular tiene un índice de refracción más grande que el

revestimiento óptico. El núcleo óptico tubular está configurado de manera que los modos de propagación cuyos momentos angulares tienen la magnitud más baja para los modos de propagación tengan sustancialmente el mismo perfil de intensidad radial.

- 5 En algunas realizaciones del segundo aparato, las magnitudes de los momentos angulares pueden incluir dos o más valores diferentes. Además, el núcleo óptico tubular puede configurarse de manera que los modos de propagación con uno de los momentos angulares de las segundas magnitudes más bajas tengan sustancialmente el mismo perfil de intensidad radial. En algunas de tales realizaciones, el núcleo óptico tubular puede configurarse de manera que los modos de propagación con uno de los momentos angulares de las terceras magnitudes más bajas tengan  
10 sustancialmente el mismo perfil de intensidad radial.

En cualquiera de las realizaciones del segundo aparato, el segundo aparato puede incluir un revestimiento óptico interno que llena el núcleo óptico tubular y tiene un índice de refracción menor que el índice de refracción del núcleo óptico tubular. En algunas de tales realizaciones, el revestimiento interno puede contener otras estructuras, tales como otro núcleo óptico, por ejemplo, un núcleo óptico sólido.  
15

En cualquiera de las realizaciones del segundo aparato, las magnitudes de los momentos angulares pueden incluir dos o más valores diferentes y el núcleo óptico tubular se puede configurar de tal manera que para cada uno de los valores, los de los modos de propagación cuyos momentos angulares tienen magnitudes del particular de los valores tienen sustancialmente el mismo perfil de intensidad radial.  
20

En cualquiera de las realizaciones del segundo aparato, el núcleo tubular puede tener un índice de refracción promedio  $n_c$  y el índice de refracción del revestimiento óptico puede tener un valor  $n_{oc}$ . Además, el valor del radio exterior del núcleo óptico tubular menos el radio interno del núcleo óptico tubular puede ser menor que una longitud de onda en la banda L de telecomunicaciones de fibra óptica sobre  $[2 ((n_c)^2 - [n_{oc}]^2)^{1/2}]$ .  
25

En cualquiera de las realizaciones del segundo aparato, el segundo aparato puede incluir además un divisor o combinador óptico que conecta ópticamente un primer puerto óptico del mismo a N segundos puertos ópticos del mismo, una red óptica plana y N guías de onda ópticas. En tales realizaciones, cada guía de onda óptica tiene un primer extremo situado cerca y que conecta ópticamente con uno correspondiente de los segundos puertos ópticos y tiene un segundo extremo situado cerca de la red óptica plana, y la red óptica plana puede difractar la luz entre un extremo de la fibra óptica y los segundos extremos de las guías de onda ópticas. En algunas de tales realizaciones, el primer puerto óptico puede acoplarse sustancialmente solo ópticamente a algunos de los modos de propagación que tienen momentos angulares del mismo valor. En algunas de tales realizaciones, aproximadamente el 90 % o más de la potencia óptica comunicada entre el primer puerto óptico y la fibra óptica puede comunicarse entre el primer puerto óptico y algunos de los modos de propagación. Dichas realizaciones pueden incluir además un modulador o desmodulador de datos ópticos configurado para desmodular un flujo de datos digitales desde un haz de luz modulado recibido desde el primer puerto óptico o para modular un portador óptico con un flujo de datos digitales y transmitir el portador óptico modulado al primer puerto óptico.  
30  
35  
40

Un tercer aparato incluye una fibra óptica multimodo que tiene un núcleo óptico tubular y un revestimiento óptico externo en contacto con el núcleo óptico tubular y alrededor de él. El núcleo óptico tubular tiene un índice de refracción más grande que el revestimiento óptico. El núcleo tubular tiene un índice de refracción promedio  $n_c$  y el índice de refracción del revestimiento óptico tiene un valor  $n_{oc}$ . El valor del radio exterior del núcleo óptico tubular menos el radio interno del núcleo óptico tubular puede ser menor que una longitud de onda (en espacio libre) en la banda L de telecomunicaciones de fibra óptica dividida por  $[2 ((n_c)^2 - [n_{oc}]^2)^{1/2}]$ .  
45

Algunas realizaciones del tercer aparato pueden incluir además un divisor o combinador óptico que conecta ópticamente un primer puerto óptico del mismo a N segundos puertos ópticos del mismo, una red óptica plana y N guías de onda ópticas. Además, cada guía de onda óptica tiene un primer extremo situado cerca y conectado ópticamente a uno correspondiente de los segundos puertos ópticos y tiene un segundo extremo situado cerca de la red óptica plana. La red óptica plana puede estar configurada para difractar la luz entre un extremo adyacente de la fibra óptica multimodo y los segundos extremos de las guías de onda ópticas. En algunas de tales realizaciones, una base ortogonal completa de modos de propagación de la fibra óptica multimodo a una frecuencia de telecomunicación óptica incluye uno de los modos de propagación con diferentes momentos angulares. Además, las guías de onda ópticas pueden construirse de forma que el primer puerto óptico se acople sustancialmente solo ópticamente a algunos de los modos de propagación, en el que los algunos de los modos de propagación tienen momentos angulares del mismo valor.  
50  
55

## 60 Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es una vista en sección transversal de una fibra óptica multimodo con un núcleo óptico tubular; las figuras 2A-2C muestran perfiles radiales del índice de refracción para ejemplos de la fibra óptica de la figura 1 para los cuales el índice de refracción es constante en el núcleo óptico tubular; las figuras 3A-3C muestran perfiles radiales del índice de refracción para ejemplos de la fibra óptica de la figura 1 para la cual el perfil radial es parabólico en el núcleo óptico tubular;  
65

las figuras 4A-4C muestran perfiles radiales del índice de refracción para ejemplos de la fibra óptica de la figura 1 para los cuales el perfil radial que es lineal por partes en el núcleo óptico tubular;  
 la figura 5 ilustra esquemáticamente perfiles de la magnitud del campo eléctrico para los modos de propagación de un ejemplo de fibra óptica con un núcleo tubular como se ilustra en la figura 1;  
 5 la figura 6 ilustra esquemáticamente perfiles de la magnitud del campo eléctrico para los modos de propagación de otro ejemplo de fibra óptica con un núcleo tubular como se ilustra en la figura 1;  
 la figura 7 ilustra esquemáticamente perfiles de la magnitud del campo eléctrico y la dirección proyectada para algunos de los modos de propagación en otro ejemplo de fibra óptica con un núcleo tubular como se ilustra en la figura 1;  
 10 la Figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra esquemáticamente un método para fabricar una fibra óptica con un núcleo óptico tubular, por ejemplo, la fibra óptica de la figura 1;  
 la Figura 9A es un diagrama de bloques que ilustra esquemáticamente un aparato que incluye un acoplador óptico para el acoplamiento del extremo a una fibra óptica multimodo, por ejemplo, la fibra óptica de la figura 1;  
 la figura 9B es una vista lateral que ilustra una configuración relativa para el acoplador óptico y la fibra óptica multimodo de la figura 9A; y  
 15 la figura 10 es una vista en sección transversal de una realización de una fibra óptica multinúcleo en la que los diversos núcleos ópticos son núcleos ópticos tubulares.

En las figuras y el texto, los símbolos de referencia similares indican elementos con funciones similares o iguales y/o una estructura similar o igual.

En las figuras, la dimensión o dimensiones relativas de alguna característica o características pueden exagerarse para ilustrar más claramente la característica o características y/o la relación o relaciones con otra característica o características en las mismas.

En el presente documento, varias realizaciones se describen de forma más completa mediante las figuras y la descripción detallada de realizaciones ilustrativas. Sin embargo, las invenciones pueden representarse de diversas formas y no están limitadas a las realizaciones descritas en las figuras y la descripción detallada de realizaciones ilustrativas.

### Descripción detallada de realizaciones ilustrativas

La figura 1 ilustra una fibra óptica multimodo 10. La fibra óptica multimodo 10 incluye un núcleo óptico tubular 12 y un revestimiento óptico externo 14, que rodea y está en contacto con el núcleo óptico tubular 12. El núcleo óptico tubular 12 tiene una sección transversal en forma de anillo. El índice de refracción,  $n_C$ , en el núcleo óptico tubular 12 es más grande que el índice de refracción,  $n_{OOC}$ , en el revestimiento óptico externo 14, es decir,  $n_C > n_{OOC}$ .

En algunas realizaciones, la fibra óptica multimodo 10 también incluye un revestimiento óptico interno 16 opcional que llena el interior del núcleo óptico tubular 12. Tal revestimiento óptico interno 16 opcional tiene un índice de refracción,  $n_{IOC}$ , que es más pequeño que el índice de refracción,  $n_C$ , en el núcleo óptico tubular 12, es decir,  $n_C > n_{IOC}$ .

Las figuras 2A-2C, 3A-3C y 4A-4C ilustran algunos ejemplos de diferentes perfiles radiales que pueden usarse para el índice de refracción (IR) en la fibra óptica 10 de la figura 1. En los perfiles radiales, la distancia radial está en el intervalo  $[0, R_1)$  para el revestimiento óptico interno 16, está en el intervalo  $[R_1, R_2]$  para el núcleo óptico tubular 12 y es mayor que  $R_2$  para el revestimiento óptico externo 14. En el presente documento, se citan distancias radiales desde el eje de una fibra óptica, por ejemplo, la fibra óptica multimodo 10.

El núcleo óptico tubular 12 puede tener un índice de refracción,  $n_C$ , con varias dependencias de la distancia radial,  $R$ , desde el eje de la fibra óptica 10. Por ejemplo, el índice de refracción,  $n_C$ , en el núcleo óptico tubular 12 puede ser radialmente constante como se ilustra en las figuras 2A-2C, puede variar radialmente parabólicamente en él como se ilustra en las figuras 3A-3C o puede variar radialmente de una forma lineal por partes como se ilustra en las figuras 4A-4C.

Los índices de refracción de los revestimientos ópticos interno y externo 16, 14 pueden tener diversas relaciones. El índice de refracción puede ser igual en los revestimientos ópticos interno y externo 16, 14 como se ilustra en las figuras 2A, 3A y 4A. Como alternativa, el índice de refracción del revestimiento óptico interno 16 puede ser más pequeño que el índice de refracción del revestimiento óptico externo 14 como se ilustra en las figuras 2B, 3B y 4B. En las figuras 2B, 3B y 4C, el núcleo óptico tubular 12 puede, por ejemplo, rodear una región vacía o llena 16. Como alternativa, el índice de refracción del revestimiento óptico interno 16 puede ser mayor que el índice de refracción del revestimiento óptico externo 14 como se ilustra en las figuras 2C, 3C y 4C.

El núcleo óptico tubular 12, el revestimiento óptico externo 14 y el revestimiento óptico interno 16 opcional pueden estar hechos de varios tipos de vidrios, por ejemplo, vidrios de sílice dopados o no dopados convencionales, polímeros sustancialmente transparentes o vidrios de calcogenuro. Por ejemplo, el núcleo óptico tubular 12 y el revestimiento o revestimientos ópticos 14, 16 pueden estar formados por vidrios de sílice o calcogenuro, o el núcleo

óptico tubular 12 puede estar formado por vidrio de sílice o calcogenuro, y uno o ambos de los revestimientos ópticos externo e interno 14, 16 pueden estar formados por un polímero sustancialmente transparente.

Debido a la simetría axial del perfil del índice de refracción sobre las fibras ópticas, la fibra óptica 10 tiene un conjunto simple de modos de propagación que son mutuamente ortogonales, normalizados y forman una base completa a una frecuencia, por ejemplo, una frecuencia en la banda C o la banda L de telecomunicación de la fibra óptica. En la base simple, cada uno de los modos de propagación tiene un campo eléctrico,  $\mathbf{E}(R, z, \phi, t)$ , por ejemplo, de la forma:  $\text{Re}[\mathbf{E}_{[\omega, m]}(R) \exp(i \cdot k \cdot z + i \cdot m \cdot \phi + i \cdot \omega \cdot t)]$ , y un campo magnético  $\mathbf{H}(R, z, \phi, t)$ , por ejemplo, de la forma:  $\text{Re}[\mathbf{H}_{[\omega, m]}(R) \exp(i \cdot k \cdot z + i \cdot m \cdot \phi + i \cdot \omega \cdot t)]$ , en la que  $\text{Re}[\mathbf{A}]$  es la parte real del vector  $\mathbf{A}$ . En este caso,  $R, z$  y  $\phi$  son un conjunto de coordenadas cilíndricas que define la distancia radial desde el eje de la fibra óptica, la distancia longitudinal a lo largo del eje de la fibra óptica y la dirección angular alrededor del eje de la fibra óptica, respectivamente. En cada modo de propagación,  $k$  es el número de onda del modo y  $m$  es el momento angular del modo. El momento angular,  $m$  es el valor propio de la función propia angular del modo,  $\exp(i \cdot m \cdot \phi)$ , bajo la acción del

$-\frac{i\partial}{\partial\phi}$

operador del momento angular

En el presente documento, el momento angular de un modo se define con respecto al centro del núcleo óptico alrededor del cual se localiza la potencia del modo, y la superficie externa del revestimiento óptico externo 14 puede no ser radialmente simétrica alrededor del núcleo óptico tubular 12 si la densidad de potencia de los modos de propagación es muy pequeña en esa superficie. Las funciones radiales  $\mathbf{E}_{[\omega, m]}(R)$  y  $\mathbf{H}_{[\omega, m]}(R)$  definieron las dependencias de los campos  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{H}$  del modo en la distancia radial,  $R$ , desde el eje de la fibra óptica multimodo 10. La independencia del índice de refracción de una fibra óptica tanto en la coordenada longitudinal en la fibra óptica, es decir, la coordenada  $z$ , como en la coordenada angular en la fibra óptica, es decir, la coordenada  $\phi$ , conduce a las funciones propias especiales descritas anteriormente para los campos eléctrico y magnético  $\mathbf{E}, \mathbf{H}$  para los modos de propagación de la base simple.

Las placas A-J de la figura 5 y las placas A'-G' de la figura 6 ilustran esquemáticamente los perfiles de sección transversal calculados para la magnitud del campo eléctrico de los modos de propagación de la base simple en los respectivos ejemplos primero y segundo de la fibra óptica multimodo 10. En cada placa A-J y A'-G', las áreas más oscuras indican regiones en las que el modo de propagación tiene un campo eléctrico de mayor magnitud.

En estos primer y segundo ejemplos de la fibra óptica multimodo 10, los tamaños de los núcleos ópticos tubulares 12 difieren. En el primer ejemplo, el radio interno,  $R_1$ , del núcleo óptico tubular 12 es más pequeño que en el segundo ejemplo. Una comparación de los perfiles para los modos de propagación de estos dos ejemplos de fibra óptica multimodo 10 puede ilustrar algunos aspectos cualitativos de cómo la base especial de los modos de propagación cambia con la anchura interna del núcleo tubular 12.

A partir de las placas A-J y A'-G' de las figuras 5 y 6, es posible adivinar los valores propios del momento angular,  $m$ , de los modos de propagación correspondientes. En particular, un modo con un valor propio del momento angular de magnitud  $|m|$  tendrá ceros en su campo eléctrico a lo largo de  $2|m|$  direcciones acimutales alrededor del eje de la fibra óptica 10.

Según esta regla, las placas A, B, C, D, E, F, G, H, I y J de la figura 5 ilustran los perfiles transversales de los modos de propagación cuyos valores propios del momento angular tienen magnitudes,  $|m|$ , de 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 0, 1 y 2, respectivamente. Los perfiles A-I transversales de la figura 5 corresponden a un conjunto de 36 modos de propagación relativamente ortogonales. Para comprender el recuento de los modos de propagación relativamente ortogonales, se observa que existen modos de propagación con polarizaciones ortogonales locales para cada par (perfil de sección transversal, valores propios del momento angular), y hay dos valores propios del momento angular de signo opuesto, es decir,  $+m$  y  $-m$ , para cada valor propio del momento angular diferente de cero,  $m$ . Por lo tanto, los perfiles de sección transversal en cada una de las placas A y H corresponden a 2 modos de propagación y los perfiles de sección transversal en cada una de las placas B-G e I-J corresponden a 4 modos de propagación.

Normalmente se sospecharía que los perfiles de intensidad para estos modos de propagación tendrían formas cualitativamente similares a los perfiles para la magnitud del campo eléctrico. Por esa razón, la figura 5 parece indicar que la base incluye modos de propagación con el mismo valor propio del momento angular y perfiles de intensidad radial sustancialmente diferentes. En particular, dos perfiles de intensidad radial son sustancialmente diferentes cuando los dos perfiles tienen diferentes números de máximos y/o mínimos y/o tienen máximos y/o mínimos situados a diferentes distancias radiales desde el eje de la fibra óptica. En particular, las placas A y H parecen indicar perfiles de intensidad radial sustancialmente diferentes, pero los mismos valores propios del momento angular, es decir,  $m = 0$ ; las placas B e I parecen indicar perfiles de intensidad radial sustancialmente diferentes, pero los mismos conjuntos de valores propios del momento angular, es decir,  $m = 1$  y  $-1$  para cada perfil; y las placas B e I parecen indicar perfiles de intensidad radial sustancialmente diferentes, pero los mismos conjuntos de valores propios del momento angular para cada perfil, es decir,  $m = 2$  y  $-2$ . Por lo tanto, el conjunto de modos de propagación ilustrados en la figura 5 incluye algunas multiplicidades de las funciones propias radiales, es decir,  $\{\mathbf{E}_{[\omega, m]}(R), \mathbf{H}_{[\omega, m]}(R)\}$ , para un valor fijo de  $m$  que difiera en más de una rotación de la polarización local. Cada conjunto de modos de propagación con el mismo valor propio del momento angular incluye perfiles de intensidad radial de

formas muy diferentes, por ejemplo, perfiles radiales sustancialmente diferentes. Debido a los perfiles radiales muy diferentes, tales conjuntos de modos de propagación con los mismos valores propios del momento angular también tendrían normalmente diferentes velocidades de modo en la fibra óptica multimodo 10.

5 Por las razones tratadas anteriormente, las placas A, B, C, D, E y F de la figura 6 parecen ilustrar perfiles de intensidad de sección transversal de modos de propagación cuyos momentos angulares tienen magnitudes,  $|m|$ , de 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6, respectivamente. Los perfiles de las placas A-F de la figura 6 parecerían corresponder a un conjunto de 26 modos de propagación relativamente ortogonales. En particular, dos modos de propagación con polarizaciones localmente ortogonales producirían el mismo perfil de sección transversal de la magnitud del campo eléctrico, y para cada modo de propagación con un valor propio del momento angular distinto de cero debería haber otro modo con el valor propio del momento angular opuesto y el mismo perfil de sección transversal de la magnitud del campo eléctrico.

15 A diferencia del conjunto de modos de propagación ilustrados en la figura 5, el conjunto de modos de propagación de la figura 6 no parece indicar múltiples modos de propagación para algunos valores propios del momento angular con la excepción de las rotaciones de polarización. Por lo tanto, el conjunto de modos de propagación ilustrados en la figura 6 parece incluir solo un único par radial de funciones propias, es decir,  $\{\mathbf{E}_{[\omega, m]}(r), \mathbf{H}_{[\omega, m]}(r)\}$ , para cada valor de  $m$ , en el que las dos funciones propias radiales corresponden a modos de propagación cuyas polarizaciones difieren en una rotación. Por lo tanto, la Figura 6 parece indicar que para cada valor del valor propio del momento angular, el conjunto completo correspondiente de modos de propagación ortonormalizados no incluye dos de tales modos con perfiles de intensidad radial diferentes o sustancialmente diferentes.

25 La observación de que las bases de los modos de propagación, en los ejemplos descritos anteriormente de la fibra óptica multimodo 10, para los cuales el radio interno,  $R_1$ , difiere, tienen formas cualitativamente diferentes, sugiere algunas conclusiones. Para los núcleos ópticos tubulares 12 con radios internos,  $R_1$ , suficientemente grandes, la fibra óptica 10 tiene, como máximo, dos modos de propagación óptica relativamente ortogonales para cada conjunto de valores permitidos de  $(m, \omega)$ . Para cada par de valores  $(m, \omega)$ , los dos modos de propagación ortogonal tienen polarizaciones localmente ortogonales. En particular, las ecuaciones de Maxwell proporcionan, como máximo, dos conjuntos de funciones  $(\mathbf{E}_{[\omega, m]}(r), \mathbf{H}_{[\omega, m]}(r))$  para definir la dependencia radial de los campos eléctrico y magnético del modo de propagación para cada conjunto permitido de índices  $(m, \omega)$ , en el que los dos campos están relacionados por una rotación de la polarización. De hecho, se espera que los modos de propagación no incluyan modos múltiples con perfiles de intensidad radial iguales  $(m, \omega)$  y sustancialmente diferentes para valores suficientemente grandes del radio interno,  $R_1$ .

35 De hecho, la cuasi ausencia de múltiples modos de propagación con la forma de perfiles de intensidad iguales  $(m, \omega)$  y sustancialmente diferentes puede ser ventajosa, es decir, hasta modos con campos girados localmente. Para realizaciones especiales de la fibra óptica multimodo 10 con dicha base ortonormal completa especial de modos de propagación, algunos acopladores ópticos pueden usarse para acoplar en el extremo sustancialmente la luz en solo aquellos modos de propagación de la fibra óptica multinúcleo 10, que tienen un valor propio del momento angular preseleccionado. Por el contrario, tales acopladores ópticos parecen ser difíciles de configurar para acoplar al extremo la luz en los ejemplos de la fibra óptica multimodo 10 con cualquier perfil de intensidad radial deseado. Es decir, en algunos ejemplos de la fibra óptica multimodo, tal acoplador óptico podría excitar diferentes modos de propagación si la fibra óptica 10 incluye modos de propagación con los mismos valores propios del momento angular, es decir, perfiles de intensidad radial iguales  $(m, \omega)$  y sustancialmente diferentes. Además, normalmente se esperaría que tales modos de propagación tuvieran diferentes velocidades del modo en la fibra óptica 10, es decir, incluso si los modos tienen el mismo  $(m, \omega)$ , porque sus diferentes distribuciones de la intensidad radial normalmente muestrearían de manera diferente las porciones radiales de la fibra óptica multimodo de índice de refracción diferente. Por lo tanto, se esperaría que tales modos de propagación con diferentes perfiles de intensidad radial viajaran durante diferentes tiempos para ser transportados por dicho ejemplo de la fibra óptica multimodo 10 desde un transmisor local a un receptor óptico remoto, incluso cuando dichos modos de propagación tengan el mismo  $(m, \omega)$ . En las comunicaciones ópticas, se espera que la eliminación de la interferencia asociada con la excitación de tales modos de propagación de los mismos valores propios del momento angular, es decir, perfiles de intensidad radial iguales  $(m, \omega)$  y sustancialmente diferentes requieran igualación durante largos intervalos temporales, es decir, debido a las velocidades de modo significativamente diferentes.

55 Por lo tanto, algunas construcciones especiales de la fibra óptica multimodo 10 parecen tener una base ortonormal completa de modos de propagación en los que las distribuciones de intensidad radial sustancialmente diferentes están ausentes entre los modos de propagación con el mismo valor propio del momento angular, es decir, para algunos o todos los valores de los valores propios del momento angular. Por esta razón, tales construcciones de la fibra óptica multimodo 10 de la figura 1 en la que el núcleo tubular 12 tiene tal base especial completa de modos de propagación pueden ser ventajosas para el acoplamiento final a la fibra óptica multimodo 10.

65 Los inventores se han dado cuenta de que tales construcciones de la fibra óptica multimodo 10 de la figura 1 están disponibles cuando la frecuencia  $\omega$  de los modos de propagación de la base completa se encuentra en la banda C de telecomunicaciones de fibra óptica y/o en la banda L de telecomunicaciones de fibra óptica. Se cree que tales ejemplos de la fibra óptica 10 están disponible para varios tipos de perfiles de índice de refracción, por ejemplo,

como se ilustra en las figuras 2A-2C, 3A-3C y 4A-4C.

Por ejemplo, las construcciones de la fibra óptica 10 con las propiedades deseadas anteriormente pueden realizarse con perfiles radiales planos por piezas del perfil de índice de refracción como se ilustra en la figura 2A. Para hacer algunas de tales realizaciones, las dimensiones de la sección transversal del núcleo óptico tubular 12 pueden construirse para satisfacer:

$$R_2 - R_1 < \lambda / [2([n_c]^2 - [n_{OC}]^2)^{1/2}].$$

En la desigualdad anterior,  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz transportada por la fibra multióptica 10;  $n_c$  son los índices de refracción del núcleo óptico tubular 12;  $n_{OC}$  es el índice de refracción de los revestimientos ópticos 14, 16; y  $R_1$  y  $R_2$  son los respectivos radios interno y externo del núcleo óptico tubular 12. Se espera que tales ejemplos tengan las propiedades deseadas anteriormente cuando  $n_c/n_{OC} \ll 2$ . En tales realizaciones, los inventores creen que el número, N, de modos de propagación ortogonales crecerá aproximadamente de una manera proporcional al radio promedio del núcleo óptico tubular 12. Por ejemplo, se cree que el número, N, viene dado aproximadamente por:

$$N = (4\pi/\lambda) \cdot (b[n_c^2 - n_{OC}^2])^{1/2} (R_1 + R_2) + 2.$$

$$(2\pi/\lambda) \cdot (R_2 - R_1) \cdot (n_c^2 - n_{OC}^2)^{1/2} (1 - b)^{1/2} = 2 \cdot \tan^{-1}((b/[1 - b])^{1/2}).$$

Además, los solicitantes creen que un mayor radio promedio del núcleo óptico tubular puede reducir la dispersión del modo.

Un ejemplo específico de las construcciones especiales tratadas anteriormente de la fibra óptica multimodo 10 de las figuras 1 y 2A puede realizarse, por ejemplo, a partir de vidrios de sílice dopados y/o no dopados. En el ejemplo específico, el núcleo óptico tubular 12 está formado por vidrio de sílice que tiene un índice de refracción de (1,45)-(1,003), por ejemplo, en una frecuencia de la banda C o la banda L de telecomunicaciones de fibra óptica y los revestimientos ópticos externos e internos están formados por vidrio de sílice con índices de refracción de 1,45 en la misma frecuencia. En el ejemplo específico, el núcleo óptico tubular 12 tiene un radio interno  $R_1$  de aproximadamente 20 micrómetros ( $\mu m$ ) y un radio exterior de aproximadamente 25  $\mu m$ . Asimismo, en el ejemplo específico, el revestimiento óptico externo 14 tiene, por ejemplo, un diámetro externo lo suficientemente grande para que sustancialmente toda la energía óptica de los modos de propagación esté confinada al vidrio de sílice de la fibra óptica 10.

Para este ejemplo especial específico de la fibra óptica 10 de las Figuras 1 y 2A, los inventores han evaluado numéricamente los perfiles del campo eléctrico de algunos de los modos de propagación. Las porciones centrales de los perfiles de sección transversal del campo eléctrico para los diferentes de estos modos de propagación se ilustran en las placas A, B, C, D, E y F de la figura 7. En las placas A-F, las direcciones y magnitudes del campo eléctrico, según se proyecta sobre la sección transversal de la fibra óptica multimodo 10, se indican mediante vectores y las magnitudes del campo eléctrico se indican cualitativamente por la oscuridad de las imágenes. Las placas A y B ilustran dos modos de propagación cuyo valor propio del momento angular,  $m$ , tiene el valor de 0 y cuyas polarizaciones son localmente ortogonales. Las placas C y D ilustran dos modos de propagación cuyos valores propios del momento angular,  $m$ , tienen el valor +1 y cuyas polarizaciones son localmente ortogonales. Las placas E y F ilustran dos modos de propagación cuyos valores propios del momento angular,  $m$ , tienen el valor -1 y cuyos perfiles de polarización son localmente ortogonales. El conjunto de modos de propagación de las placas A-F son relativamente ortogonales debido a los diferentes valores de su valor propio del momento angular "m" o debido a la ortogonalidad local de sus polarizaciones.

Para diversos perfiles radiales del índice de refracción, los inventores creen que la fibra óptica multimodo 10 de la figura 1 puede tener bases completas deseables y cualitativamente diferentes de modos de propagación a frecuencias en la banda C de telecomunicaciones de fibra óptica y/o la banda L de telecomunicaciones de fibra óptica. Para tales perfiles radiales del índice de refracción, los modos de propagación de la base con el mismo valor propio del momento angular tendrán sustancialmente el mismo o el mismo perfil de intensidad radial y, por lo tanto, tendrán las mismas velocidades de modo. Pero, para diferentes perfiles de refracción radial, tales conjuntos deseables de modos de propagación pueden existir para los valores propios del momento angular de la magnitud más baja; la primera y segunda magnitudes más bajas; la primera, segunda y tercera magnitudes más bajas, ..., o todas las magnitudes, porque la forma de la base cambia con el perfil del índice de refracción radial. Por lo tanto, variando el perfil del índice de refracción, se puede variar el número de valores propios del momento angular para los cuales los modos de propagación de un valor propio del momento angular particular tienen la misma velocidad de modo y tienen sustancialmente el mismo perfil de intensidad radial.

La figura 8 ilustra un método 30 para construir una fibra óptica multimodo con un núcleo óptico tubular. La fibra óptica multimodo puede ser uno de los ejemplos de la fibra óptica multimodo 10 de la figura 1, que tiene una base ortonormal completa deseable de modos de propagación como ya se ha descrito. Es decir, la base solo puede incluir

- modos de propagación con un único perfil de intensidad radial o sustancialmente un único perfil de intensidad radial para cada valor propio del momento angular de un conjunto. Por ejemplo, el conjunto puede incluir el valor o valores propios del momento angular de la magnitud más baja, los valores propios del momento angular de la segunda magnitud más baja, los valores propios del momento angular de la tercera magnitud más baja y/o todos los valores propios del momento angular. La fibra óptica puede construirse de modo que no tenga tales propiedades deseables, por ejemplo, construyendo el radio interno y/o el radio exterior del núcleo óptico tubular para que tenga valores apropiados.
- El método 30 incluye formar un cilindro central de un primer material para un revestimiento óptico interno (etapa 32). Por ejemplo, el material para el cilindro central puede incluir material o materiales no dopados de germanio, hidrógeno y/o deuterio convencionales para formar una varilla preforma óptica de vidrio de sílice.
- El método 30 incluye formar un primer tubo de un segundo material para un núcleo óptico tubular (etapa 34). Por ejemplo, el primer tubo puede incluir material o materiales no dopados o dopados con germanio, hidrógeno o deuterio para un tubo preforma de vidrio de sílice.
- El método 30 incluye formar un segundo tubo del primer material o de un tercer material diferente para un revestimiento óptico externo (etapa 36). Por ejemplo, el segundo tubo puede incluir material o materiales no dopados o dopados con germanio, hidrógeno o deuterio para un tubo preforma de vidrio de sílice.
- El método 30 incluye colocar el cilindro central en el primer tubo y colocar el primer tubo en el segundo tubo y, a continuación, congelar el núcleo y el primer y segundo tubos, por ejemplo, en un horno, para formar una preforma cilíndrica de vidrio que tiene un perfil del índice de refracción radial seleccionado (etapa 38). La etapa de congelación 38 forma una preforma óptica en la que la región central cilíndrica tiene un índice de refracción,  $n_{10C}$ , bajo, la primera región tubular alrededor de la región central cilíndrica tiene un índice de refracción,  $n_C$ , alto y la segunda región tubular alrededor de la primera región tubular tiene un índice de refracción,  $n_{00C}$ , bajo, es decir,  $n_{10C} < n_C$  y  $n_{00C} < n_C$  como se ha indicado anteriormente.
- El método 30 también incluye extraer una fibra óptica multimodo a partir de la preforma óptica producida en la etapa 38 (etapa 40). La extracción se puede realizar colocando un extremo de la preforma en una torre de extracción de fibras convencional que funde gradualmente la superficie del extremo de la preforma de modo que se pueda extraer una fibra óptica de la parte fundida de la preforma. En particular, el perfil del índice radial en la fibra óptica estirada corresponde al perfil del índice radial en la preforma, cuyo extremo se funde gradualmente y/o uniformemente para producir el material para extraer la fibra óptica. Durante la extracción de la fibra se puede torsionar o no la fibra óptica con  $90^\circ$  de mitigar la dispersión del modo de polarización dentro de un modo azimutal y radial dado.
- En diversas realizaciones, el método 30 produce una fibra óptica que es uno de los ejemplos especiales de las fibras ópticas multimodo 10 ilustradas por las figuras 1, 2A-2C, 3A-3C y/o 4A-4C.
- Las figuras 9A-9B ilustran esquemáticamente un acoplador óptico 50 que puede usarse para acoplarse en el extremo a la fibra óptica multimodo 10 de la figura 1, por ejemplo, a los ejemplos específicos ya tratados. En particular, el acoplador óptico 50 puede acoplar selectivamente tal luz a los modos de propagación individuales de la fibra óptica multimodo o a pares de tales modos en los que los campos están relacionados por una rotación de polarización fija, por ejemplo, como se ilustra en la figura 7, placas A y B, placas C y D, o placas E y F.
- El acoplador óptico 50 incluye una pluralidad de N guías de onda ópticas planas  $52_1, 52_2, 52_3, 52_4, \dots, 52_N$ ; una red óptica plana 54; un divisor o combinador de potencia óptica  $1 \times N$  56; y, opcionalmente, incluye un modulador o desmodulador óptico de datos 58. Los componentes  $52_1-52_N, 54, 56$  y 58 pueden estar integrados en una superficie 60 de un único sustrato o pueden estar ubicados en múltiples sustratos.
- Cada guía de onda óptica  $52_1-52_N$  tiene un primer extremo situado y ópticamente conectado a uno de los correspondientes N segundos puertos ópticos N del divisor o combinador de potencia óptica  $1 \times N$  56 y tiene un segundo extremo situado a lo largo de la periferia lateral de la red óptica plana 54. Los segundos extremos de las guías de onda ópticas  $52_1-52_N$  pueden distribuirse a distancias iguales o desiguales a lo largo de la periferia lateral de la red óptica plana 54. En algunas otras realizaciones, cada una de las guías de onda ópticas  $52_1-52_N$  puede reemplazarse por un grupo de guías de onda ópticas planas con poca separación.
- La red óptica plana 54 tiene un patrón regular de características (f), que están situadas simétricamente alrededor del centro de la red óptica plana 54. Las características f pueden formar un conjunto concéntrico de polígonos regulares y espaciados regularmente (no mostrados) alrededor del centro de la red óptica plana 54. Como alternativa, las características f pueden formar un conjunto de círculos concéntricos y espaciados regularmente (como se muestra) alrededor del centro de la red óptica plana 54. Las características f forman un patrón regular que difracta la luz recibida de los segundos extremos de las guías de onda ópticas  $52_1-52_N$ , al extremo de la fibra óptica multimodo 10 y/o difracta la luz recibida desde el extremo adyacente de la fibra óptica multimodo 10, a los segundos extremos de las guías de onda ópticas  $52_1-52_N$ . El centro de la red óptica plana 54 normalmente está alineada lateralmente de forma efectiva con el centro del extremo de la fibra óptica multimodo 10, que está acoplada a los extremos como se



muestra en la figura 9B.

5 En algunas realizaciones, el divisor o combinador de potencia óptica 56 puede dividir en potencia un haz de luz recibido en un primer puerto óptico 62, por ejemplo, un haz de luz digital modulado por datos digitales desde el modulador o desmodulador óptico 58 y redirige una parte del haz de luz recibida en cada una de las N guías de onda ópticas 52<sub>1</sub>-52<sub>N</sub>. El divisor o combinador de potencia óptica 56 puede dirigir porciones aproximadamente iguales o desiguales del haz de luz recibido a cada una de las N guías de onda ópticas 52<sub>1</sub>-52<sub>N</sub>. En algunas de tales realizaciones, el divisor o combinador de potencia óptica 56 puede, por ejemplo, realizar dicha función de división óptica en un transmisor óptico.

10 En otras realizaciones, el divisor o combinador de potencia óptica puede interferir con la luz recibida desde los primeros extremos de las guías de onda ópticas 52<sub>1</sub>-52<sub>N</sub>, para producir un haz de luz saliente en el primer puerto óptico 62, por ejemplo, un haz de luz dirigido al modulador o desmodulador óptico 58. En algunas de tales realizaciones, el divisor o combinador de potencia óptica 56 puede, por ejemplo, realizar dicha función de combinación óptica en un receptor óptico.

15 El modulador o desmodulador de datos ópticos 58 opcional puede modular un flujo de datos digitales en un portador óptica y enviar el portador óptico modulado al primer puerto óptico 62 del divisor o combinador de potencia óptica 56, por ejemplo, en un transmisor óptico.

20 Como alternativa, el modulador o desmodulador de datos ópticos 58 opcional puede desmodular un flujo de datos digitales desde un portador óptico modulado por datos recibido desde el primer puerto óptico 62 del divisor o combinador de potencia óptica 56, por ejemplo, en un receptor óptico.

25 En las diversas realizaciones, el divisor o combinador de potencia óptica 56, las guías de onda ópticas 52<sub>1</sub>-52<sub>N</sub>, y la red óptica plana 54 funcionan conjuntamente como un filtro óptico coincidente. En particular, estos componentes 56, 52<sub>1</sub>-52<sub>N</sub>, 54 forman N trayectos ópticos paralelos entre el primer puerto óptico 62 del divisor o combinador de potencia óptica 56 y el extremo de la fibra óptica multimodo 10 situada adyacente a la red óptica plana 54.

30 En diversas realizaciones, las longitudes de los trayectos ópticos efectivos de los N trayectos ópticos paralelos están configuradas para proporcionar un acoplamiento seleccionado entre el primer puerto óptico 62 del divisor o combinador de potencia óptica 16 y los modos de propagación de la fibra óptica 10. En particular, las longitudes de los trayectos ópticos efectivos de los N trayectos ópticos paralelos fijan el acoplamiento óptico entre el primer puerto óptico 62 y los modos de propagación individuales de la guía de onda óptica multimodo 10. Las fases relativas introducidas por las diferencias en las longitudes de los trayectos ópticos efectivos de los N trayectos ópticos paralelos determinan los acoplamientos ópticos con los diversos modos de propagación de la fibra óptica 10.

35 En este caso, la longitud del trayecto óptico efectivo de una guía de onda óptica es la longitud del trayecto óptico equivalente para la propagación de luz en la guía de onda óptica, que puede depender del modo. En la guía de onda óptica, la luz muestrea los índices de refracción del núcleo óptico y el revestimiento óptico y, por lo tanto, se propaga como si la guía de onda óptica tuviera un índice óptico efectivo. La longitud del trayecto óptico efectivo de una guía de onda óptica es la longitud del trayecto óptico determinada por el índice de refracción efectivo de la guía de onda óptica.

40 En una realización de ejemplo, la atenuación óptica entre el extremo adyacente de la guía de onda óptica 10 y el primer puerto óptico 62 es aproximadamente la misma para la luz que atraviesa cualquiera de las guías de onda ópticas individuales 52<sub>1</sub>-52<sub>N</sub>. Además, los segundos extremos de las guías de onda ópticas 52<sub>1</sub>-52<sub>N</sub> están separados en separaciones angulares iguales alrededor del centro de la red óptica plana 54, que está ella misma alineada lateralmente con el centro de la fibra óptica 10. En esta realización, el acoplamiento del primer puerto óptico 62 a un modo de propagación de la fibra óptica multimodo 10 con el momento angular "m" y la función propia del momento angular  $e^{im\phi}$  viene dada por:

$$C \sum_{n=1}^{n=N} e^{-i2nm\pi/N} e^{iPh(n)}$$

55 En este caso,  $C e^{iPh(n)}$  es la matriz del canal óptico del n-ésimo trayecto óptico en el conjunto de N trayectos ópticos paralelos entre el primer puerto óptico 62 y el extremo adyacente de la fibra óptica multimodo 10, y C y Ph (n) son la magnitud y la fase de la matriz del canal, es decir, las fases {Ph (n)} de las matrices del canal dependen del trayecto óptico específico. En un ejemplo, si el k-ésimo trayecto óptico en el conjunto de N trayectos tiene una matriz de canales  $C e^{i2mk\pi/N}$  para todo k en [1, N], entonces el primer puerto óptico 62 solo se acoplará ópticamente significativamente al modo de propagación de la fibra óptica multimodo 10 cuyo momento angular es m. Sin embargo, en otras realizaciones, los N trayectos ópticos pueden configurarse para tener matrices de canales que definen otro conjunto de fases {Ph (1), Ph (2), ..., Ph (N)} y todavía producen un acoplamiento óptico solo con el modo de propagación con EL momento angular "m".

Algunas realizaciones del acoplador óptico 50 de las figuras 9A-9B pueden incluir características y/o estructuras y/o pueden construirse y/o usarse con métodos descritos para acopladores ópticos de las solicitudes de patente de Estados Unidos incorporadas anteriormente.

5 La figura 10 ilustra una fibra óptica multinúcleo 10' que incluye un revestimiento óptico externo 14 y P núcleos ópticos tubulares  $12_1, 12_2, \dots, 12_P$  distribuidos en el revestimiento óptico externo 14. En este caso, P es un número entero mayor que 2, por ejemplo, P puede ser 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, .... Los núcleos ópticos tubulares individuales  $12_1 - 12_P$  pueden estar llenos de revestimientos internos correspondientes  $16_1, 16_2, \dots, 16_P$  o pueden estar huecos. Los núcleos ópticos tubulares  $12_1, 12_2, \dots$  y  $12_P$  tienen respectivos índices de refracción  $n_{c1}, n_{c2}, \dots$  y  $n_{cP}$  que son todos más grandes que el índice de refracción  $n_{OOC}$  del revestimiento óptico externo 14. Además, el índice de refracción  $n_{ck}$  del k-ésimo núcleo óptico tubular  $12_k$  es más grande que el índice de refracción  $n_{IOCK}$  de su revestimiento óptico interno 14 cuando está presente. Finalmente, la fibra óptica 10' tiene P conjuntos separados de distintos modos de propagación ópticos, en los que los modos de propagación del conjunto k-ésimo tienen sus potencias concentradas en y cerca del k-ésimo núcleo óptico tubular  $12_k$ , es decir, tienen menos del 5 % y a menudo tienen menos del 1 % de su potencia óptica en los otros núcleos ópticos tubulares  $12_1-12_P$ .

10 En la fibra óptica multinúcleo 10', los núcleos ópticos tubulares individuales  $12_1-12_P$  están separados lateralmente por distancias sustanciales de modo que cada núcleo óptico tubular  $12_1-12_P$  y cualquier porción cercana del revestimiento óptico 14,  $16_1-16_P$  funciona sustancialmente como una fibra óptica multimodo separada, es decir, una realización de la fibra óptica 10 de la figura 1. De hecho, cada modo de propagación que se concentra en y cerca de uno de los núcleos ópticos tubulares  $12_1-12_P$  no tiene potencia óptica sustancial en cualquier otro de los núcleos ópticos tubulares  $12_1-12_P$ , por ejemplo, menos del 5 % de la potencia en dicho modo de propagación y, a menudo, menos del 1 % de la energía de dicho modo está en otro núcleo óptico tubular  $12_1-12_P$ . Por lo tanto, cada núcleo óptico tubular  $12_k$  y el revestimiento óptico cercano 14,  $16_k$  forma una realización de la fibra óptica multimodo 10 de la figura 1. Los núcleos ópticos tubulares individuales pueden tener cualquiera de los perfiles de índice de refracción ilustrados en las figuras 2A-2C, 3A-3C y 4A-4C, y cada núcleo óptico tubular  $12_1-12_P$  se puede usar con el acoplador óptico 50 de las Figuras 9A-9B.

20 La fibra óptica multinúcleo 10' de la figura 10 puede producirse a partir de P preformas ópticas hechas de acuerdo con el método 30 de la figura 8. Cada una de las P preformas ópticas es, por ejemplo, adecuada para la extracción de una fibra óptica multimodo con un núcleo óptico tubular. Las P preformas se apilan unas al lado de otras y se consolidan en un horno para producir una única preforma óptica con múltiples núcleos tubulares en su interior. La fibra multinúcleo 10' de la figura 10 se puede formar extrayendo una fibra óptica a partir de esta preforma mediante métodos convencionales.

30 Además, la fibra óptica multinúcleo 10' de la figura 10 se puede hacer mediante el método 40 de la solicitud provisional de Estados Unidos 61/433.437, presentada el 17 de enero de 2011, por Peter J. Winzer, si las preformas de la etapa 42 en la misma se reemplazan con preformas producidas en la etapa 38 del método 30 descrito en la presente solicitud.

40 Otros métodos y/o estructuras para acoplar simultáneamente los portadores ópticos modulados por datos a diferentes conjuntos linealmente independientes de modos de propagación ópticos de una guía de onda óptica multimodo pueden, por ejemplo, describirse en una o más de la solicitud de patente de Estados Unidos 61/428.154, presentada por Christopher Doerr y Peter Winzer el 29 de diciembre de 2010; la solicitud de patente de Estados Unidos 12/827641, presentada por Rene'-Jean Essiambre et al, el 30 de junio de 2010; la publicación de solicitud de patente de Estados Unidos 20100329671; y la publicación de solicitud de patente de Estados Unidos 201039670. Algunos de los métodos y/o estructuras, que se describen en los documentos mencionados en este párrafo, pueden ser adecuados para conectar uno o más moduladores o desmoduladores de datos ópticos, por ejemplo, componente o componentes 58 de las figuras 9A-9B, a la fibra óptica multimodo 10 de la figura 1 o 9B y/o a los núcleos ópticos tubulares individuales  $12_1-12_N$  de la guía de onda óptica multinúcleo 10' de la figura 10.

A partir de la divulgación, dibujos y reivindicaciones, otras realizaciones de la invención serán evidentes para los expertos en la técnica.

## REIVINDICACIONES

1. Un aparato que comprende:

5 una fibra óptica (10, 10') que tiene un núcleo óptico tubular (12) para el cual una base ortogonal completa de modos de propagación en una frecuencia de telecomunicaciones ópticas incluye uno de los modos de propagación con diferentes momentos angulares, teniendo la fibra óptica (10, 10') un revestimiento óptico externo (14) en contacto con el núcleo óptico tubular (12) y alrededor de él, teniendo el núcleo óptico tubular (12) un índice de refracción mayor que el revestimiento óptico (14); y  
 10 en donde el núcleo óptico tubular (12) está configurado de forma tal que los modos de propagación con momentos angulares de la magnitud más baja tienen una sola velocidad de grupo, los modos de propagación con momentos angulares de la segunda magnitud más baja tienen una sola velocidad de grupo y los modos de propagación con momentos angulares de la tercera magnitud más baja tienen una sola velocidad de grupo.

15 2. El aparato de la reivindicación 1, en el que el núcleo óptico tubular (12) está configurado de manera tal que para cada magnitud específica de los momentos angulares, los modos de propagación con momentos angulares de la magnitud específica tienen la misma velocidad de grupo.

3. El aparato de la reivindicación 1, que además comprende:

20 un divisor o combinador óptico (56) que conecta ópticamente un primer puerto óptico (62) del mismo a N segundos puertos ópticos del mismo;  
 una red óptica plana (54); y  
 N guías de onda ópticas (52<sub>1</sub>, ..., 52<sub>N</sub>), teniendo cada guía de onda óptica un primer extremo localizado cerca y conectando ópticamente a uno correspondiente de los segundos puertos ópticos y teniendo un segundo extremo localizado cerca de la red óptica plana (54), estando configurada la red óptica plana (54) para difractar la luz entre un extremo de la fibra óptica (10, 10') y los segundos extremos de las guías de onda ópticas (52<sub>1</sub>, ..., 52<sub>N</sub>).  
 25

4. El aparato de la reivindicación 1, en el que la fibra óptica (10, 10') incluye un segundo núcleo óptico tubular (12) que está localizado en el revestimiento óptico externo (14) y está configurado de manera que los modos de propagación del segundo núcleo (12) con momentos angulares de la magnitud más baja para el segundo núcleo óptico (12) tienen una sola velocidad de grupo, los modos de propagación del segundo núcleo (12) con momentos angulares de la segunda magnitud más baja para el segundo núcleo óptico (12) tienen una sola velocidad de grupo y los modos de propagación del segundo núcleo (12) con momentos angulares de la tercera magnitud más baja para el segundo núcleo óptico (12) tienen una sola velocidad de grupo.  
 30  
 35

5. El aparato de la reivindicación 1, en el que el núcleo óptico tubular (12) está configurado de manera que los modos de propagación cuyos momentos angulares tienen la magnitud más baja para los modos de propagación tienen sustancialmente el mismo perfil de intensidad radial.  
 40

6. El aparato de la reivindicación 5, en el que las magnitudes de los momentos angulares incluyen dos o más valores diferentes; y en el que el núcleo óptico tubular (12) está configurado de manera que los modos de propagación con uno de los momentos angulares de la segunda magnitud más baja tienen sustancialmente el mismo perfil de intensidad radial.  
 45

7. El aparato de la reivindicación 5, en el que el núcleo tubular (12) tiene un índice de refracción promedio  $n_c$  y el índice de refracción del revestimiento óptico (14) tiene un valor  $n_{oc}$ , y un valor del radio exterior del núcleo óptico tubular (12) menos el radio interno del núcleo óptico tubular (12) es menor que  $\lambda/[2([n_c]^2 - [n_{oc}]^2)^{1/2}]$ , en la que  $\lambda$  es una longitud de onda en la banda L de telecomunicaciones de fibra óptica.  
 50

8. El aparato de la reivindicación 5, que además comprende:

un divisor o combinador óptico (56) que conecta ópticamente un primer puerto óptico (62) del mismo a N segundos puertos ópticos del mismo;  
 55 una red óptica plana (54); y  
 N guías de onda ópticas (52<sub>1</sub>, ..., 52<sub>N</sub>), teniendo cada guía de onda óptica un primer extremo localizado cerca y conectando ópticamente a uno correspondiente de los segundos puertos ópticos y teniendo un segundo extremo localizado cerca de la red óptica plana (54), pudiendo la red óptica plana (54) difractar la luz entre un extremo de la fibra óptica (10, 10') y los segundos extremos de las guías de onda ópticas (52<sub>1</sub>, ..., 52<sub>N</sub>).  
 60

FIG. 1

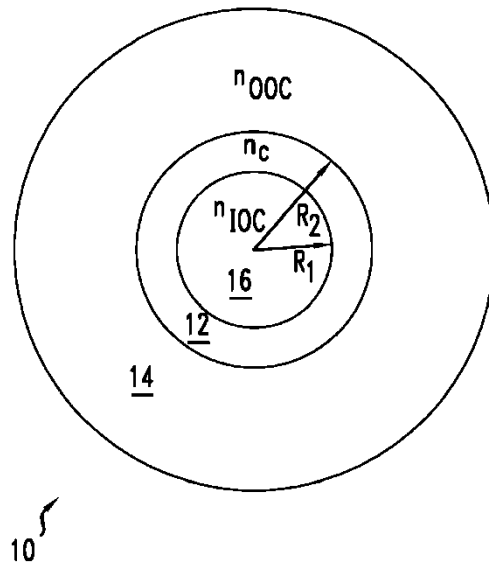


FIG. 2A

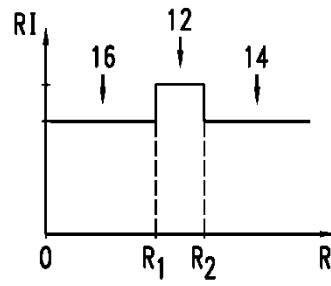


FIG. 2B

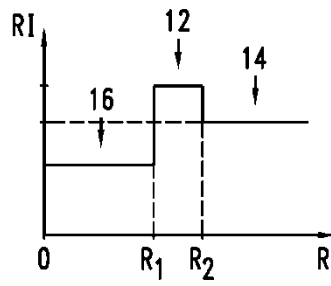


FIG. 2C

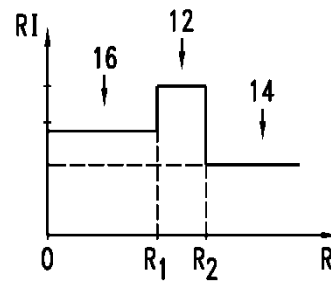


FIG. 3A

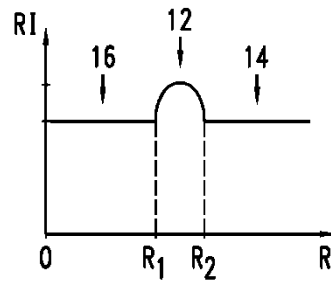


FIG. 3B

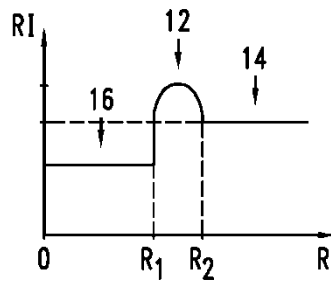


FIG. 3C

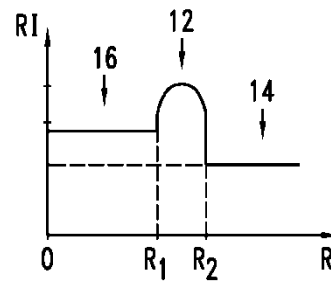


FIG. 4A

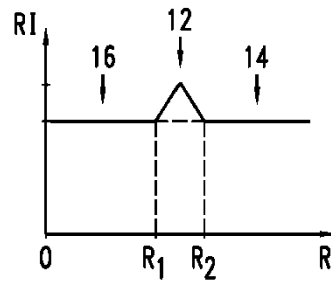


FIG. 4B

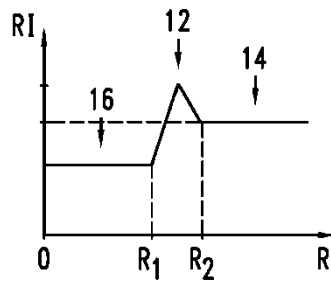
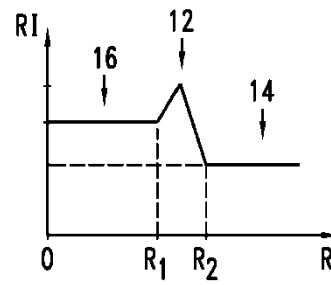
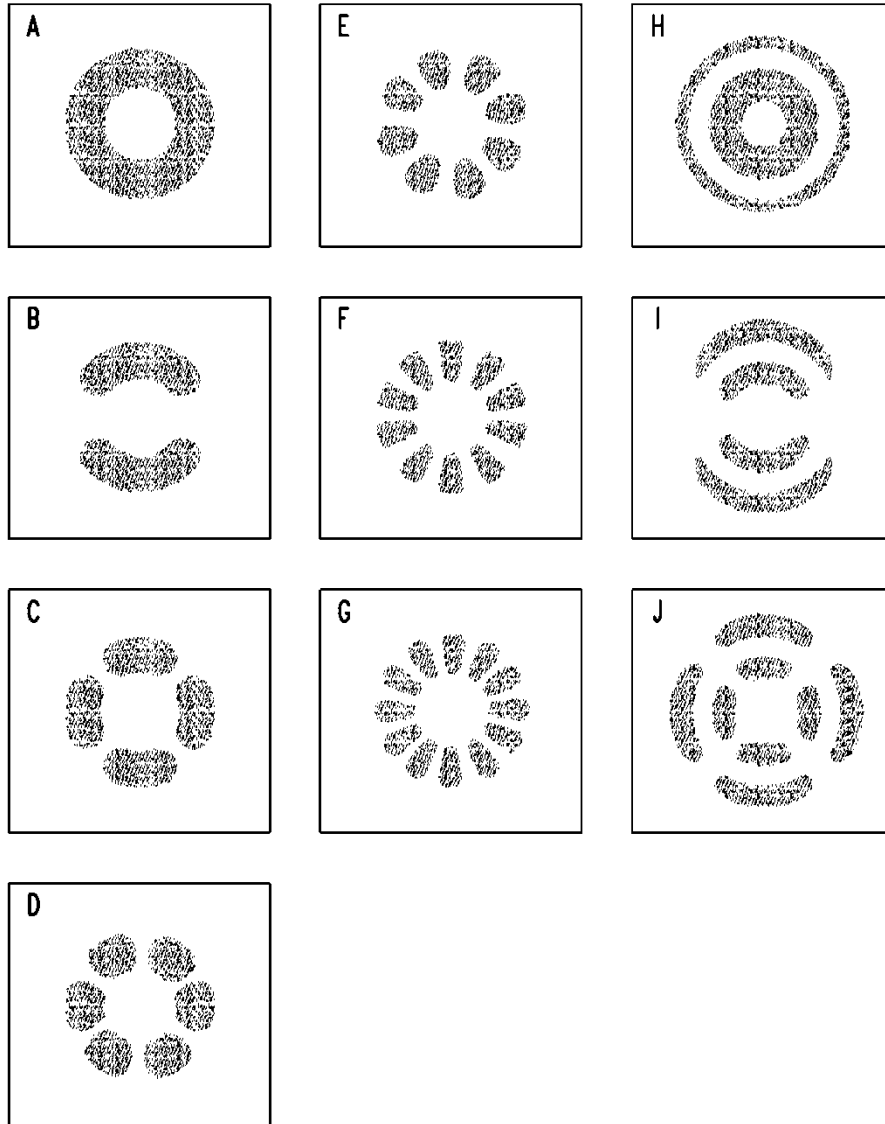


FIG. 4C



*FIG. 5*





**FIG. 6**

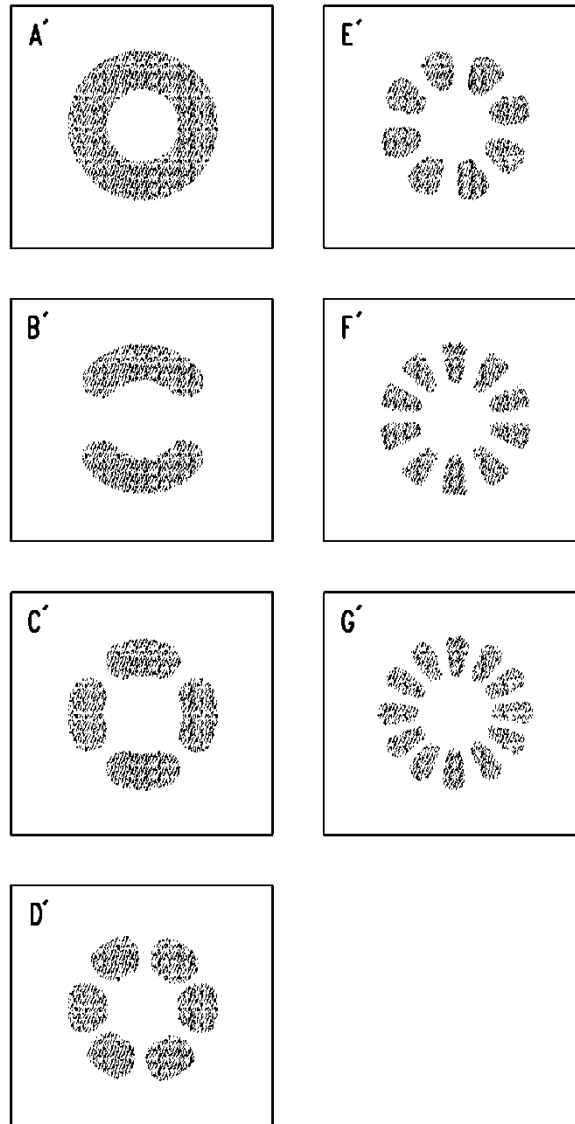
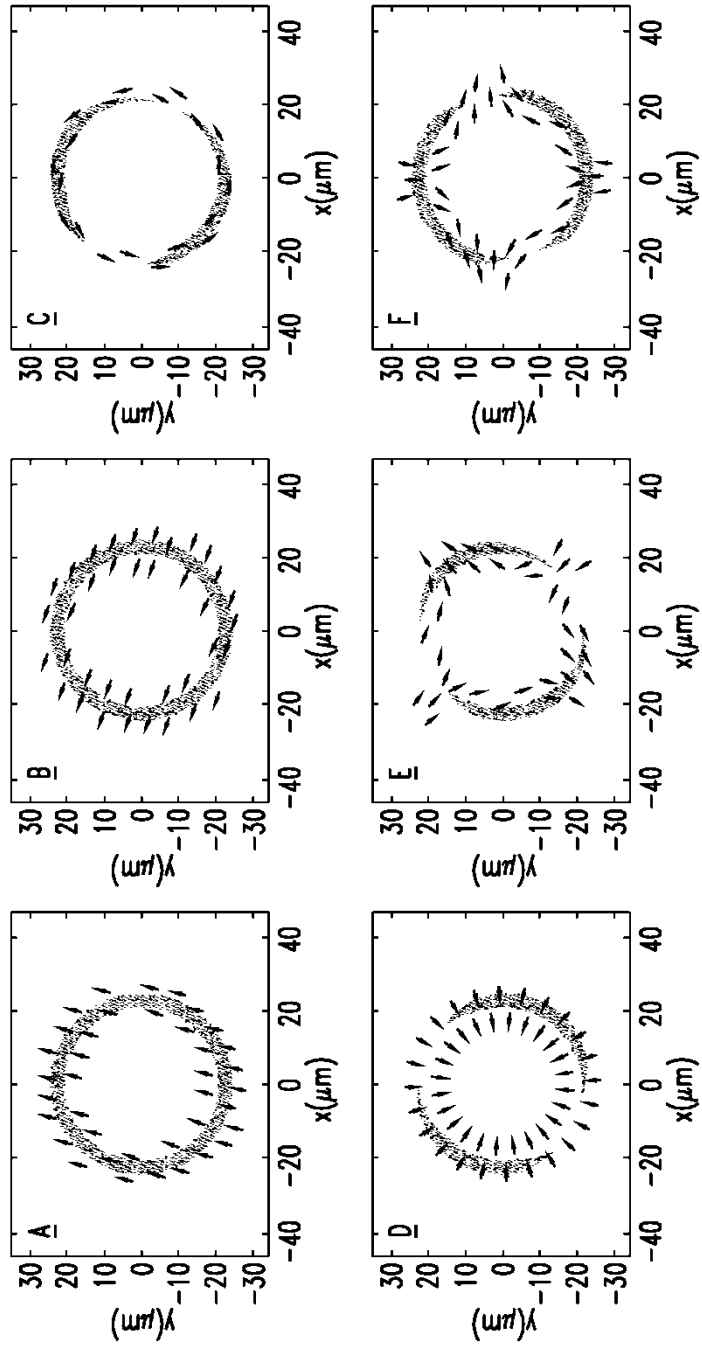
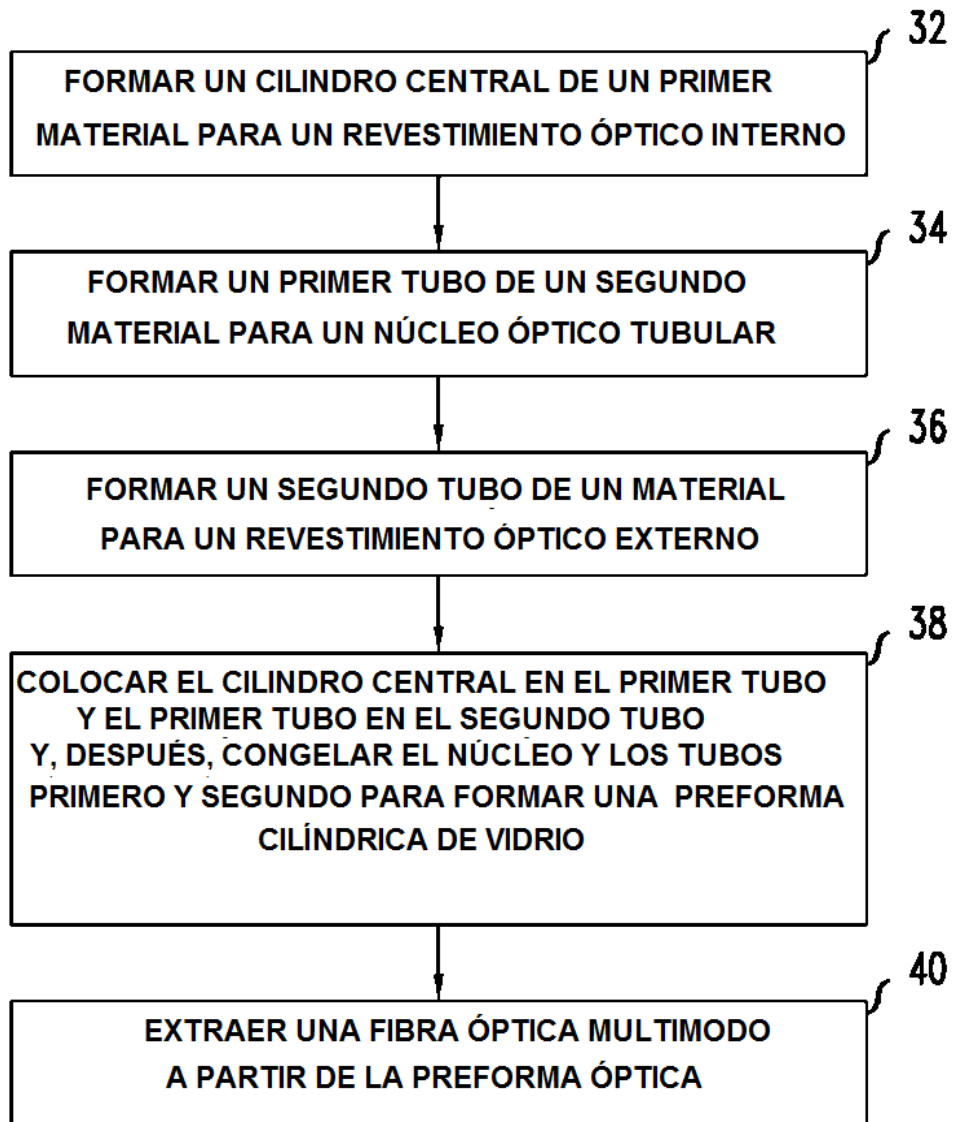


FIG. 7

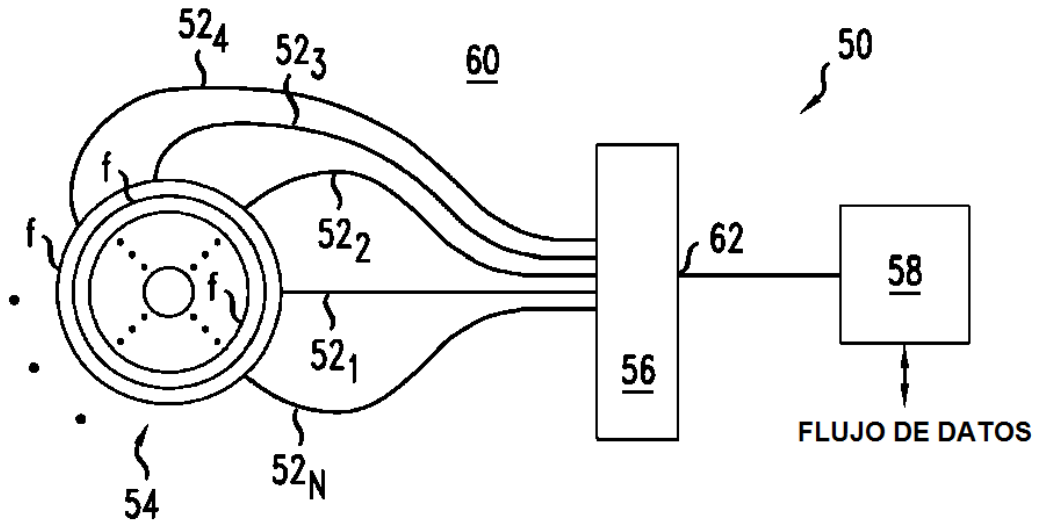


**FIG. 8**

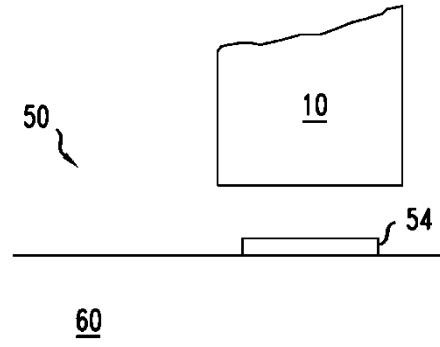


30

FIG. 9A



*FIG. 9B*



*FIG. 10*

