

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 889 949**

51 Int. Cl.:

**G02B 6/44**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.05.2017 PCT/US2017/033027**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.11.2017 WO17205131**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.05.2017 E 17803300 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.06.2021 EP 3465298**

54 Título: **Cable de fibra óptica, alta densidad de fibra, baja pérdida por curvatura**

30 Prioridad:

**25.05.2016 US 201662341369 P**

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

**14.01.2022**

73 Titular/es:

**CORNING OPTICAL COMMUNICATIONS LLC  
(100.0%)**

**4200 Corning Place  
Charlotte, NC 28216, US**

72 Inventor/es:

**BOOKBINDER, DANA CRAIG;  
KOUZMINA, INNA IGOREVNA;  
LI, MING-JUN;  
SEDDON, DAVID ALAN y  
TANDON, PUSHKAR**

74 Agente/Representante:

**CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel**

**ES 2 889 949 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**

Cable de fibra óptica, alta densidad de fibra, baja pérdida por curvatura

5 Referencia cruzada a aplicaciones relacionadas

Esta solicitud reivindica el beneficio de prioridad de la Solicitud Provisional U.S. No. 62/341,369, presentada el 25 de mayo 2016.

10 Antecedentes de la invención

La descripción se refiere en general a cables y más particularmente a cables de fibra óptica que tiene una alta densidad de fibra óptica y baja pérdida por curvatura a pesar de la alta densidad de la fibra óptica. Los cables ópticos se han utilizado cada vez más en una amplia variedad de campos, incluidos varios campos de la electrónica y las telecomunicaciones. Los cables ópticos contienen o rodean una o más fibras ópticas. El cable proporciona estructura y protección a las fibras ópticas dentro del cable. El documento US 8,467,650 se refiere a una fibra óptica que posee un sistema de recubrimiento. Cuando se combina con una fibra de vidrio insensible a la flexión, el sistema de recubrimiento produce una fibra óptica que tiene bajas pérdidas. El sistema de recubrimiento presenta un recubrimiento primario más suave con características de baja temperatura para proteger contra la micro curvatura en cualquier entorno y en las situaciones físicas más difíciles.

Breve descripción de la invención

La invención se refiere a un cable de fibra óptica con las características de la reivindicación 1. Otras realizaciones preferidas se establecen en las reivindicaciones dependientes.

Breve descripción de los dibujos

FIG. 1 es una vista de sección transversal de un cable de fibra óptica según un ejemplo de realización.  
 30 FIGS. 2A-2C son vistas de sección transversal de tubos de protección de fibra óptica según ejemplos de realizaciones.  
 FIG. 3 es un gráfico que muestra la relación mínima entre el diámetro interior del tubo protector y el diámetro exterior de la fibra óptica en función del número de fibras ópticas en el tubo protector.  
 FIG. 4 es una vista de sección transversal de un cable de fibra óptica según otro ejemplo de realización.  
 35 FIG. 5 es una vista de sección transversal de un cable de fibra óptica según otro ejemplo de realización.  
 FIG. 6 es una vista de sección transversal de un cable de fibra óptica según otro ejemplo de realización.  
 FIG. 7 es una vista de sección transversal de un cable de fibra óptica según otro ejemplo de realización.  
 FIG. 8 muestra un perfil de índice de refracción correspondiente a una realización de una fibra de guía de ondas óptica como se describe en el presente documento.  
 40 FIG. 9 muestra un perfil de índice de refracción de una realización de una fibra óptica como se describe en este documento.  
 FIG. 10 muestra un perfil de índice de refracción de una realización de una fibra óptica como se describe en este documento.  
 FIG. 11 muestra un perfil de índice de refracción de una realización de una fibra óptica como se describe en este documento.  
 45 FIG. 12 muestra un perfil de índice de refracción de una realización de una fibra óptica como se describe en este documento.  
 FIG. 13 muestra un perfil de índice de refracción de una realización de una fibra óptica como se describe en este documento.  
 50 FIG. 14 muestra un perfil de índice de refracción de una realización de una fibra óptica como se describe en este documento.

Descripción detallada de la invención

55 Con referencia en general a las figuras, se muestran varias realizaciones de un cable de fibra óptica. Como antecedente, algunas aplicaciones de cables de fibra óptica se implementan o utilizan de manera que pueden inducir pérdidas por curvatura en las señales ópticas transmitidas a través de las fibras ópticas del cable. Estas pérdidas por curvatura pueden ser causadas por despliegues de cables que incluyen radios de curvatura estrechos, compresión de fibra óptica, etc., que inducen pérdidas por curvatura. Además, estas pérdidas por curvatura se pueden experimentar en una amplia variedad de cables, tales como conjuntos de cables de caída óptica, cables de distribución con sistemas de terminación instalados en fábrica (FITS) y bucles flojos.

Además, las pérdidas por curvatura pueden ser mayores en cables en los que las fibras ópticas están densamente empaquetadas en tubos de protección relativamente rígidos, se empaquetan densamente dentro de una camisa de cable y/o están densamente empaquetados en una disposición de cinta de fibra óptica. Las pérdidas por curvatura en tales cables son causadas, al menos en parte, por la restricción posicional resultante del empaque denso que

limita la capacidad de las fibras ópticas para desplazarse para asumir posiciones de baja deformación durante la flexión, compresión, etc. o configuraciones del tubo protector incluyen una cantidad significativa de espacio libre entre las superficies exteriores de las fibras ópticas y la superficie interna del tubo protector o camisa, y este espacio libre permite que las fibras ópticas se muevan o cambien para asumir posiciones de baja tensión durante la flexión.

5 Al reducir el estrés que experimentan las fibras ópticas durante la flexión, estos cables de baja densidad proporcionan un nivel satisfactorio de atenuación de la señal, pero lo hacen con un tubo de protección de diámetro relativamente grande y/o una camisa de cable relativamente grande.

10 En realizaciones particulares discutidas en el presente documento, el solicitante ha desarrollado un nuevo tubo de protección altamente empacado y el diseño de cable altamente empacado que utiliza un nuevo diámetro pequeño, diseño de fibra óptica con pérdida por curvatura baja. Como se analiza en el presente documento, el solicitante ha desarrollado un tubo de protección de bajo diámetro y altamente empacado que tiene una baja pérdida por curvatura y, de manera similar, el solicitante ha desarrollado un cable de fibra óptica de bajo diámetro y altamente empacado que tiene una baja pérdida por curvatura. En realizaciones particulares, el solicitante cree que las fibras ópticas de bajo diámetro, insensibles a la flexión, como se discute en este documento, permiten el empaquetado de fibra densa, aunque la sabiduría del diseño de cable/tubo protector convencional indicaría que tal densidad de empaque daría como resultado pérdidas de flexión inaceptables debido a la posición, la restricción y el aumento resultante de la tensión sobre las fibras ópticas durante el plegado. Estos cables de fibra óptica de diámetro reducido y muy compactados pueden proporcionar una serie de ventajas que incluyen limitar la congestión de los conductos, permitir el ventilado de los cables a través de los conductos, reducir el peso del cable y el uso de material, etc.

20 Haciendo referencia a la FIG. 1, se ilustra un cable óptico, mostrado como cable 10, según un ejemplo de la realización. El cable 10 incluye una camisa exterior del cable, mostrada como camisa exterior 12, que tiene una superficie interior 14 que define un paso o cavidad interior, mostrada como un orificio central 16, y una superficie exterior 18 que generalmente define la superficie más exterior del cable 10. Como se entenderá en general, la superficie interna 14 de la camisa 12 define como un área o región interna dentro de la cual se ubican los diversos componentes del cable discutidos en este documento.

30 En varias realizaciones, la camisa de cable 12 se forma a partir de un material termoplástico extruido. En diversas realizaciones, la camisa del cable 12 puede ser una variedad de materiales usados en la fabricación de cables tales como polietileno, polietileno de densidad media, cloruro de polivinilo (PVC), difluoruro de polivinilideno (PVDF), nailon, poliéster o policarbonato y sus copolímeros. Además, el material de la camisa del cable 12 puede incluir pequeñas cantidades de otros materiales o rellenos que proporcionan propiedades diferentes al material de la camisa del cable 12. Por ejemplo, el material de la camisa del cable 12 puede incluir materiales que proporcionen coloración, bloqueo de los rayos UV/luz (por ejemplo, negro de humo), resistencia a las quemaduras, etc.

40 El cable 10 incluye uno o más elementos de transmisión óptica o guías de ondas ópticas, que se muestran como fibras ópticas 20. En la realización mostrada, los grupos de fibras ópticas 20 están ubicados en tubos de protección 22 separados, y los tubos de protección 22 se envuelven (por ejemplo, en un patrón de trenzado SZ) alrededor de un miembro de refuerzo central 24. En varias realizaciones, el cable 10 incluye al menos cuatro tubos de protección 22. El miembro de refuerzo central 24 puede ser cualquier miembro de refuerzo axial adecuado, como una varilla de plástico reforzado con vidrio, varilla/alambre de acero, etc. Generalmente, el cable 10 proporciona estructura y protección a las fibras ópticas 20 durante y después de la instalación (por ejemplo, protección durante la manipulación, protección contra los elementos, protección contra el medio ambiente, protección contra alimañas, etc.).

50 En diversas realizaciones, el cable 10 también incluye una capa de blindaje, se muestra como un blindaje 26. En general, el blindaje 26 se forma a partir de una tira de material metálico (por ejemplo, una cinta metálica, una pieza de material continua alargada plana, etc.) que se envuelve y rodea la circunferencia de los tubos de protección 22. Como se muestra en la FIG. 1, el blindaje 26 está ubicado adyacente a la superficie interior de la camisa exterior 12 de manera que estas dos capas están en contacto entre sí. En realizaciones específicas, el blindaje 26 es un material de cinta de acero corrugado que se envuelve alrededor de las porciones interiores del cable 10, y en algunas de tales realizaciones, el blindaje 26 se pliega longitudinalmente formando una sección longitudinal superpuesta donde los bordes opuestos de la cinta se superponen para rodear completamente los tubos de protección internos 22 (y cualquier otro componente interior del cable 10). En otras realizaciones, el blindaje 26 puede ser una tira de material de cinta metálica, enrollada helicoidalmente alrededor de los tubos de protección 22 de manera que el blindaje 26 forme una capa que rodea la circunferencia de los tubos de protección 22. En general, la capa de blindaje 26 proporciona una capa adicional de protección a las fibras 20 dentro del cable 10 y puede proporcionar resistencia contra daños (por ejemplo, daños causados por contacto o compresión durante la instalación, daños por elementos, daños por roedores, etc.). El cable 10 puede incluir una variedad de otros componentes o capas, tales como aglutinantes envueltos helicoidalmente, aglutinantes de película delgada circunferenciales constrictivos, materiales de cinta que bloquean el agua, materiales de fibra que bloquean el agua, etc. Como se define aquí, el diámetro mínimo del núcleo del cable es el diámetro mínimo sin trenzado del conjunto de tubos de protección que rodea y el miembro central. En algunas realizaciones, el trenzado de los tubos de protección aumentará el diámetro del núcleo del cable entre un 1 y un 15 por ciento. En algunas realizaciones, el trenzado de los tubos de protección aumentará el diámetro del núcleo del cable entre un 1 y un 5 por ciento.

En la realización mostrada, el cable 10 incluye una o más funciones de corte preferencial y/o de cable de apertura 28 incrustado en o debajo de la camisa 12. En esta realización, la característica de corte preferencial y/o el cable de apertura 28 se ubican con la camisa 12 de manera que la cuerda de apertura 28 facilita la apertura de la camisa exterior 12. En algunas realizaciones, la cuerda de apertura 28 puede estar ubicada dentro de la capa de armadura 26 de manera que la cuerda de apertura 28 facilite la apertura tanto de la armadura 26 como de la camisa 12.

Como se señaló anteriormente, el cable 10, las fibras ópticas 20 y el tubo de protección 22 están configurados de varias maneras para proporcionar una alta densidad de fibra, cable de alta densidad de fibra, mientras que al mismo tiempo reducir o minimizar el tamaño del tubo de protección y/o el tamaño de la camisa del cable. Como se analiza en el presente documento, la fibra óptica de bajo diámetro permite un cable más pequeño y de mayor densidad, y el diseño de baja pérdida de curvatura de estas fibras ópticas permite que dicho cable pequeño y de alta densidad tenga propiedades aceptables de pérdida de señal.

Haciendo referencia a las FIGS. 2A -2C, se muestran varios diseños de tubos de protección que tienen diferentes niveles de densidad de empaquetamiento de fibras. FIGS. 2A-2C muestran tres diseños de tubos de protección diferentes, mostrados como tubos de protección 22', 22" y 22"". En general, los tubos de protección 22', 22" y 22"" son tubos poliméricos que rodean, protegen y organizan las fibras ópticas 20, y los tubos de protección adicionales 22', 22" y 22"" son generalmente iguales entre sí excepto por el diámetro interior del tubo de protección y la disposición de empaquetamiento de fibra óptica resultante dentro de cada tubo de protección se discuten con más detalle a continuación. Además, debe entenderse que el cable 10 puede incluir tubos de protección 22', 22" y/o 22"" en cualquier combinación. En varias realizaciones, el cable 10 incluye solo uno de los tipos de tubos de protección 22', 22" o 22"", y en otras realizaciones, el cable 10 incluye una mezcla de tubos de protección 22', 22" y/o 22"".

Haciendo referencia a la FIG. 2A, el tubo de protección 22' incluye una pared de tubo de protección 30 que tiene una superficie interior 32 y una superficie exterior 34. La superficie interior 32 define un canal de tubo de protección 36 dentro del cual se ubican las fibras ópticas 20. Como se muestra en la FIG. 2A, las fibras ópticas 20 están dispuestas en un grupo exterior 38 y un grupo interior 40 dentro del canal 36. Generalmente, las fibras ópticas 20 del grupo exterior 38 están ubicadas en la parte exterior del canal 36 adyacente a (por ejemplo, a menos de 0,5 micrómetros) o en contacto con la superficie interior 32 de manera que el grupo exterior 38 rodea al grupo interior 40. El grupo interior 40 se encuentra generalmente en una región central del canal 36.

La superficie interior 32 define un tubo de protección de diámetro interior D1, y en la realización específica mostrada en la figura. 2A, D1 tiene un tamaño tal que las fibras ópticas 20 tienen una restricción posicional total. En la realización específica mostrada en la FIG. 2A, el diámetro interior del tubo de protección 22' es pequeño en relación con el diámetro exterior de la fibra, D2, y el número de fibras, N, lo que da como resultado la restricción posicional completa mostrada en la FIG. 2A. En particular, el tubo de protección 22' tiene un tamaño tal que una longitud máxima de separación, mostrada como G, medida entre cualquier par de fibras ópticas adyacentes 20 del grupo exterior 38 es menor que un diámetro exterior, D2, de una o más fibras ópticas 20 de grupo interior 40 de modo que las fibras ópticas 20 del grupo interior 40 se bloqueen para que no se muevan desde el grupo interior 40 al grupo exterior 38. Por tanto, de esta manera, el tubo de protección 22' da como resultado una disposición de fibra completamente restringida en posición, y en esta disposición, el tubo de protección 22' proporciona una unidad de fibras ópticas densamente empaquetada. Específicamente, la parte del área del canal 36 ocupada por fibras ópticas 20 es alta y el diámetro interno total D1 es bajo, lo que da como resultado un tubo de protección con un gran número de fibras en un área relativamente pequeña.

En realizaciones particulares, el solicitante ha determinado una relación entre D1 y D2 que define empaquetamiento denso de fibras ópticas 20 dentro del tubo de protección 22' como proporcionado por la presente divulgación. Como ejemplo específico, en varias realizaciones discutidas en este documento, las fibras ópticas 20 están densamente empaquetadas dentro del tubo de protección 22' de manera que un parámetro de relación de diámetro,  $\Omega$  (Omega), que se define como la relación,  $D1/D2$ , es menor que  $2,66 + 0,134(N)$ , donde N es el número de fibras ópticas 20 dentro del tubo de protección 22', y además, en una realización específica,  $\Omega$  es también mayor que  $2,25 + 0,143(N)$ , donde N es el número de fibras ópticas 20 dentro del tubo de protección 22'. En varias realizaciones, N es al menos 4, específicamente N es mayor que 6, y más específicamente N es de 8 a 24, incluidos 8 y 24. En otra realización, N es de 12 a 24, incluidos 12 y 24. En otra realización, N es mayor que 24, y en una de tales realizaciones,  $8 \leq N \leq 48$ . En la realización específica mostrada en la FIG. 2A, N es 12, D1 es mayor o igual a 4,030 veces el OD de la fibra y menor o igual a 4,273 veces el OD de la fibra. Además, en esta realización de 12 fibras, el grupo exterior 38 tiene 9 fibras ópticas 20 y el grupo interior 40 tiene 3 fibras ópticas 20.

En diversas realizaciones, el grado de empaquetamiento de las fibras ópticas 20 dentro del tubo 22' puede ser entendido como la relación entre el diámetro mínimo, D4, de un círculo que circunscribe todas las fibras 20 del grupo exterior 38. En las realizaciones mostradas en las FIGS. 2A-2C, D4 es relativamente grande, de modo que más de la mitad, y específicamente todas las fibras 20 del grupo exterior 38, están en contacto con la superficie interior 32. En diversas realizaciones, las fibras 20 se empaquetan de manera que  $D4/D1$  sea mayor que 0,95, específicamente mayor que 0,97, más específicamente mayor que 0,99 e incluso más específicamente mayor que 0,995. En varias realizaciones de cable que utilizan estos tubos de protección densamente empaquetados, el solicitante cree que la interacción entre las superficies externas de las fibras 20 y la superficie interna 32 de la pared del tubo 30 puede

5 aumentar la resistencia a la tracción del cable construido a partir de tales tubos, y en tales realizaciones, la utilización de las diversas fibras insensibles a la flexión descritas en este documento proporciona una atenuación óptica satisfactoria a pesar del alto nivel de interacción fibra/tubo.

5 Haciendo referencia a la FIG. 2B y 2C, se muestran diferentes niveles de densidad de empaquetamiento de fibra y restricción de posición. FIG. 2B muestra un tubo protector 22" ajustado para proporcionar una restricción de posición parcial al movimiento de la fibra óptica 20 dentro del tubo protector 22", según un ejemplo de realización. Como se muestra en la FIG. 2B, el diámetro interior D1 del tubo de protección 22" tiene un tamaño tal que una de las fibras ópticas 20 del grupo interior 40 simplemente encaja en el espacio 42 entre un par de fibras ópticas 20 adyacentes del grupo exterior 38 y puede volver al grupo interior 40. Como comparación, la FIG. 2C muestra el tubo de protección 22" ajustado para no proporcionar restricción de posición sobre las fibras ópticas 20 dentro del tubo de protección de 22".

15 En diversas realizaciones, los tubos de protección 22 del cable 10 como se discute en este documento tienen por lo menos algún tipo de restricción de posición. Como ejemplo específico, en varias realizaciones discutidas en el presente documento, las fibras ópticas 20 están densamente empaquetadas dentro de un tubo de protección, como el tubo de protección 22' de 22", de modo que un parámetro de relación de diámetro,  $\Omega$ , que se define como la relación,  $D1/D2$ , es menor que  $1,14 + 0,313(N)$ , donde N es el número de fibras ópticas 20 dentro del tubo de protección 22' o 22", y además, en una realización específica,  $\Omega$  es también mayor que  $2,25 + 0,143(N)$ , donde N es el número de fibras ópticas 20 dentro del tubo de protección 22' y 22". En varias realizaciones, N es al menos 4, específicamente N es mayor que 6, y más específicamente N es de 8 a 24, incluidos 8 y 24. En otra realización, N es de 12 a 24, incluidos 12 y 24. En otra realización, N es mayor que 24, y en una de tales realizaciones,  $8 \leq N \leq 48$ . En la realización específica mostrada en la FIG. 2B, N es 12, D1 del tubo de protección de 22" es mayor o igual a 4,273 veces el OD de la fibra y menor o igual a 4,87 veces el OD de la fibra y específicamente menos de 4,864 veces el OD de la fibra. Además, en esta realización de 12 fibras del tubo de protección 22", el grupo exterior 38 tiene 9 fibras ópticas 20, y el grupo interior 40 tiene 3 fibras ópticas 20, y se permite que una fibra óptica 20 del grupo interior 40 se mueva parcialmente en el espacio 42 como se muestra en la FIG. 2B.

30 A modo de comparación, la FIG. 2C, muestra un tubo de protección de 22" ajustado para no tener restricciones de posición, de modo que uno o más fibras ópticas 20 se muevan libremente entre el grupo interno 40 y el grupo externo 38, lo que permite que las fibras ópticas 20 asuman posiciones de baja deformación durante la flexión, pero requiere un diámetro interno D1 más grande y un empaque menos denso en comparación con los tubos de protección 22' y 22". Específicamente, como se muestra en la FIG. 2C, las fibras ópticas 20 no están densamente empaquetadas dentro del tubo de protección 22" de modo que un parámetro  $\Omega$  de relación de diámetro, del tubo de protección 22" que se define como la relación,  $D1/D2$ , es mayor que  $1,14 + 0,313(N)$ , donde N es el número de fibras ópticas 20 dentro del tubo de protección 22", para, N mayor que 6, N mayor que 24 y N de 8 a 24, incluidos 8 y 24. En la realización específica mostrada en la FIG. 2C, N es 12, D1 del tubo de protección de 22" es mayor o igual a 4,864 veces el diámetro exterior de la fibra.

40 En realizaciones específicas, el empaquetado de fibra densa y alto recuento de fibra dentro del tubo de protección 22' se facilita por una fibra óptica que tiene un diámetro exterior bajo, y varias propiedades de la fibra óptica que permite la pérdida de señal baja a pesar del empaque denso y el alto recuento de fibra. En diversas realizaciones, tales fibras pueden tener una variedad de propiedades en varias combinaciones, tales como un diámetro exterior D2 menor de 210 micrones, un diámetro de campo modal de más de 9 micrones a 1310 nm, un corte de cable de menos de 1260 nm, una pérdida por macrocurvatura de menos de 0,5 dB/vuelta a 1550 nm para un mandril de 20 mm de diámetro, y/o una pérdida por microcurvatura de tambor cubierto con malla de alambre a 1550 nm de menos de 0,03 dB/km. En realizaciones específicas, las fibras ópticas 20 pueden ser cualquiera de las fibras ópticas o incluir cualquiera de las características o características de la fibra óptica discutidas en el presente documento.

50 En diversas realizaciones, las paredes del tubo 30 de tubos de protección 22', 22" y 22" son estructuras de polímero relativamente rígido, relativamente gruesas de tal manera que, durante la flexión, paredes de los tubos 30 no se deforman en un grado suficiente para permitir que para fibras ópticas 20 para asumir una posición de baja deformación mediante la deformación de la propia pared del tubo de protección. Esto contrasta con algunos conjuntos de fibra óptica o micromódulos que están densamente empaquetados mediante el uso de camisas del conjunto delgadas y flexible. En tales conjuntos de fibra óptica, se consigue un empaquetamiento denso y unas características de pérdida de curvatura aceptables a través de la naturaleza flexible de la envoltura del conjunto que permite el movimiento de la fibra durante el curvado. En contraste con tales conjuntos de fibra óptica, en varias realizaciones, los tubos de protección 22' y 22" no permiten un movimiento sustancial y logran características de pérdida de curvatura aceptables mediante el uso de fibras ópticas insensibles a la curvatura de bajo diámetro, como las que se describen en este documento.

55 En diversas realizaciones, paredes del tubo 30 tienen un espesor T1 que es de entre 50 micrómetros y 250 micrómetros. Según la invención, las paredes del tubo 30 se forman a partir de un material que tiene un módulo de elasticidad a 25°C entre 0,8 GPa y 3 GPa. En varias realizaciones discutidas aquí, las paredes de tubo 30 que tienen estos espesores y/o módulos forman estructuras tubulares relativamente rígidas que no se doblan, estiran, deforman, etc. en una cantidad significativa dentro del cable y, por lo tanto, en tales realizaciones, las fibras ópticas

20 son fibras insensibles a la flexión como se describe en este documento. Tales fibras insensibles a la flexión permiten una baja atenuación óptica a pesar de residir en tubos 30 muy compactados, gruesos y/o de alto módulo.

Las paredes del tubo de protección 30 pueden estar hechos de una variedad de materiales poliméricos adecuados. En una realización, las paredes 30 del tubo de protección se forman a partir de un material de polipropileno. En otra realización, las paredes 30 del tubo de protección están formadas a partir de un material de policarbonato. En varias realizaciones, las paredes del tubo de protección 30 están formadas por uno o más materiales poliméricos que incluyen tereftalato de polibutileno (PBT), poliamida (PA), polioximetileno (POM), cloruro de polivinilo (PVC), PCV retardante de llama, poli (etileno-co-tetrafluoroeteno) (ETFE), o varias combinaciones de los materiales poliméricos discutidos en este documento, etc. En varias realizaciones, el material de las paredes del tubo protector 30 puede incluir varios rellenos o aditivos que incluyen materiales bloqueadores de UV y materiales resistentes a quemaduras.

Como un ejemplo específico de los distintos ajustes del tubo de protección y fibra de empaqueo de la presente descripción, la fig. 3 muestra un gráfico de la relación mínima entre el diámetro interior del tubo de protección y el diámetro exterior de la fibra en función del número de fibras en el tubo de protección. El gráfico 50 muestra el diámetro efectivo normalizado del conjunto asumido para un número definido de fibras en un conjunto y el gráfico 52 muestra el diámetro interno mínimo normalizado del tubo para acomodar solo un número definido de fibras. Este es un ajuste a los datos modelados que definen el diámetro mínimo normalizado del círculo circunscrito para ajustarse alrededor de cada conjunto de fibras de 1 a 48 fibras.

Con referencia de nuevo a la FIG. 1, en realizaciones particulares, uno o más tubos de protección 22 del cable 10 es uno o más de los tubos de protección densamente empaquetados, tales como los tubos de protección 22' y 22" descritos anteriormente. En tales realizaciones, el empaque denso y el diámetro pequeño de los tubos de protección 22 'o 22" permiten que el cable 10 también esté empaquetado densamente y tenga un diámetro pequeño a pesar de tener un gran número de fibras ópticas 20. Como se muestra en la FIG. 1, el cable 10 tiene un diámetro exterior, D3, que es menor de 15 mm, y en la realización particular mostrada, el cable 10 tiene este diámetro exterior bajo mientras que incluye al menos 72 fibras ópticas ubicadas en 6 tubos de protección.

Haciendo referencia a la FIG. 4, se muestra un cable de fibra óptica 60 según un ejemplo de una realización. El cable 60 es sustancialmente el mismo que el cable 10 excepto por lo que se describe en el presente documento. Como se muestra, el cable 60 incluye al menos 144 fibras ópticas e incluye al menos 12 tubos de protección 22, cada uno de los cuales incluye 12 fibras ópticas 20. Al igual que el cable 10, el cable 60 incluye un diámetro exterior D3 menor de 15 mm, y los tubos de protección 22 son tubos de protección 22' totalmente restringidos. En otras realizaciones, los tubos de protección 22 del cable 60 pueden ser tubos de protección 22" y/o tubos de protección 22"". Además, el cable 10 incluye un miembro 62 de resistencia central encamisado que incluye la parte 64 central y una cubierta 66 exterior. En realizaciones particulares, la parte central 64 puede ser relativamente rígida, tal como un material metálico o plástico reforzado con vidrio, y la cubierta exterior 66 es un recubrimiento de polímero.

Haciendo referencia a la FIG. 5, se muestra un cable de fibra óptica 70 según un ejemplo de una realización. El cable 70 es sustancialmente el mismo que el cable 10 excepto por lo que se describe en el presente documento. Como se muestra, el cable 70 incluye al menos 96 fibras ópticas e incluye al menos 8 tubos de protección 22, cada uno de los cuales incluye 12 fibras ópticas 20. Como el cable 10, el cable 70 incluye un diámetro exterior D3 que es menor de 15 mm, y los tubos de protección 22 son tubos de protección 22' totalmente restringidos. En otras realizaciones, los tubos de protección 22 del cable 70 pueden ser tubos de protección 22" y/o tubos de protección 22"".

Haciendo referencia a la FIG. 6, se muestra un cable de fibra óptica 80 según un ejemplo de una realización. El cable 80 es sustancialmente el mismo que el cable 10 excepto por lo que se describe en el presente documento. Como se muestra, el cable 80 incluye al menos 72 fibras ópticas e incluye al menos 6 tubos de protección 22, cada uno de los cuales incluye 12 fibras ópticas 20. En la realización específica mostrada, los tubos de protección 22 son tubos de protección 22"" no restringidos. Por tanto, el cable 80 consigue una pérdida de curvatura muy baja mediante el uso de ambos tubos de protección 22"" no tensos que permiten que las fibras 20 se muevan durante el plegado para lograr posiciones de deformación baja en combinación con las fibras ópticas de bajo diámetro y pérdida de curvatura discutidas aquí.

Haciendo referencia a la FIG. 7, se muestra un cable de fibra óptica 90 según un ejemplo de una realización. El cable 90 es sustancialmente el mismo que el cable 10 excepto por lo que se describe en el presente documento. Como se muestra, el cable 90 incluye un solo tubo protector 92 y una pila 94 de una pluralidad de cintas 96 de fibra óptica. Cada cinta de fibra óptica 96 incluye una pluralidad de fibras ópticas 20 rodeadas y soportadas por una matriz polimérica 98. En varias realizaciones, el cable 90 incluye al menos cuatro cintas dentro de la pila 94 y cada cinta 96 soporta cuatro fibras ópticas 20. En algunas realizaciones, como el cable 10, el cable 90 incluye un diámetro exterior D3 que es menor de 15 mm. En tales realizaciones, el cable 90 proporciona un cable plano de bajo diámetro y baja pérdida por curvatura que utiliza las fibras ópticas de bajo diámetro y baja pérdida por curvatura descritas en el presente documento.

Fibras ópticas de baja pérdida por curvatura

Como se ha indicado anteriormente en diversas realizaciones, las fibras ópticas 20 descritas en este documento están configuradas para experimentar pérdida de señal baja durante la flexión. En varias realizaciones, las fibras ópticas 20 discutidas anteriormente en relación con las disposiciones de cables y tubos de protección, pueden ser cualquiera de las fibras ópticas discutidas aquí y específicamente pueden configurarse como las diversas realizaciones de fibra óptica 110, discutidas a continuación.

De acuerdo con al menos algunas realizaciones las fibras ópticas tienen bajas pérdidas por curvatura inducida especialmente para curvas cerradas, tales como curvas de 15 mm de diámetro, para aplicaciones en centros de datos y fibra a las instalaciones de origen. Según al menos algunas realizaciones, las fibras ópticas descritas en este documento son compatibles con versiones anteriores de los sistemas de redes de fibra instalados existentes. Según al menos algunas realizaciones, las fibras ópticas descritas en este documento tienen un diámetro de campo de modo 1310 > 9 micrómetros para tener bajas pérdidas de empalme con las fibras ópticas instaladas existentes. Las fibras ópticas descritas en este documento se pueden cablear y pueden ser parte de un sistema de red que tiene un transmisor y un receptor.

El "perfil de índice de refracción" es la relación entre el índice de refracción o índice de refracción relativo y el radio de la fibra. El radio para cada segmento del perfil del índice de refracción viene dado por las abreviaturas  $r_1, r_2, r_3, r_{4a}, r_4$ , etc. y en este caso se utilizan minúsculas y mayúsculas como intercambiabilidad (p. ej.,  $r_1$  es equivalente a  $R_1$ ).

El "porcentaje relativo de índice de refracción" (también denominado en este documento como "porcentaje de índice de refracción delta", "índice de refracción relativo", "delta índice de refracción", y "delta relativo índice de refracción") se define como  $\Delta\% = 100 \times (n_i^2 - n_c^2) / 2n_c^2$ , y como se usa en este documento,  $n_c$  es el índice de refracción promedio de la sílice sin dopar. Como se usa en este documento, el índice de refracción relativo está representado por  $\Delta$  y sus valores se dan en unidades de "%", a menos que se especifique lo contrario. Los términos: delta,  $\Delta$ ,  $\Delta\%$ , %  $\Delta$ , delta %, % delta y porcentaje delta pueden usarse indistintamente en este documento. Para las realizaciones descritas en el presente documento, se puede obtener un perfil de índice de refracción relativo equivalente desplazando todo el perfil de índice de refracción de la fibra óptica hacia arriba o hacia abajo. En los casos en los que el índice de refracción de una región es menor que el índice de refracción promedio de la sílice sin dopar, el porcentaje de índice de refracción relativo es negativo y se dice que tiene una región o un índice deprimidos. En los casos en que el índice de refracción de una región es mayor que el índice de refracción promedio de la región de revestimiento, el porcentaje de índice de refracción relativo es positivo. En la presente memoria, se considera que un "mejorante" es un dopante que tiene una propensión a elevar el índice de refracción en relación con el SiO<sub>2</sub> puro sin dopar. Un "downdopant" se considera aquí como un dopante que tiene una propensión a reducir el índice de refracción en relación con el SiO<sub>2</sub> puro sin dopar. Ejemplos de mejorantes incluyen GeO<sub>2</sub> (germania), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, Cl, Br. Ejemplos de dopantes incluyen flúor y boro.

La "dispersión cromática", denominada en el presente documento "dispersión" a menos que se indique lo contrario, de una fibra de guía de ondas es la suma de la dispersión del material, la dispersión de la guía de ondas y la dispersión intermodal. En el caso de fibras de guía de ondas monomodo, la dispersión intermodal es cero. La longitud de onda de dispersión cero es una longitud de onda en la que la dispersión tiene un valor de cero. La pendiente de dispersión es la tasa de cambio de dispersión con respecto a la longitud de onda.

El "área efectiva" se define en la ecuación 1 como:

$$A_{\text{eff}} = 2\pi \left( \int f^2 r \, dr \right)^2 / \left( \int f^4 r \, dr \right) \quad \text{Eq. 1}$$

donde los límites de integración son de 0 a  $\infty$ ,  $r$  es la distancia radial desde el centro del núcleo, y  $f$  es la componente transversal del campo eléctrico asociado con la luz propagada en la guía de ondas. Como se usa en el presente documento, "área efectiva" o " $A_{\text{eff}}$ " se refiere al área óptica efectiva a una longitud de onda de 1550 nm a menos que se indique lo contrario.

El término "a-perfil" se refiere a un perfil de índice de refracción, expresado en términos de  $\Delta(r)$  que está en unidades de "%", donde  $r$  es el radio, que sigue la ecuación 2, que se muestra a continuación

$$\Delta(r) = \Delta(r_0) \left( 1 - \left[ \frac{|r - r_0|}{r_1 - r_0} \right]^\alpha \right) \quad \text{Eq. 2}$$

donde  $r_0$  es el punto (ubicación radial) en el núcleo en el que  $\Delta(r)$  es máximo,  $r_1$  es el punto en el que  $\Delta(r)\%$  es cero, y  $r$  está en el rango  $r_0 \leq r \leq r_1$ , donde  $\Delta$  se define arriba,  $r_i$  es el punto inicial de la  $\alpha$ -perfil,  $r_f$  es el punto final del  $\alpha$ -perfil, y  $\alpha$  es un exponente que es un número real (denominado "núcleo  $\alpha$ ", "núcleo alfa", "valor alfa" o "valor  $\alpha$ " en el presente documento).

El diámetro del campo modal (MFD) se mide utilizando el método de Peterman II donde,  $2w = \text{MFD}$ , y  $w^2 = (2 \int f^2 r$

$dr/\int[df/dr]^2 r dr$ , siendo los límites integrales de 0 a  $\infty$ .

La resistencia a la flexión de una fibra de guía de ondas se puede medir mediante atenuación inducida en condiciones de prueba prescritas, por ejemplo, desplegando o enrollando la fibra alrededor de un mandril de un diámetro prescrito, por ejemplo, enrollando 1 vuelta alrededor de 6 mm, mandril de 10 mm, o 20 mm o de diámetro similar (por ejemplo, "pérdida de macrocurvatura de 1x10 mm de diámetro" o la "pérdida de macrocurvatura de 1x20 mm de diámetro") y medir el aumento de atenuación por vuelta.

Un tipo de ensayo de flexión es la prueba de microcurvatura de carga lateral. En esta prueba denominada de "carga lateral" (LLWM), se coloca una longitud prescrita de fibra guía de ondas entre dos placas planas. Una malla de alambre # 70 está unida a una de las placas. Una longitud conocida de fibra de guía de ondas se intercala entre las placas y se mide una atenuación de referencia mientras las placas se presionan juntas con una fuerza de 30 Newtons. Luego se aplica una fuerza de 70 Newton a las placas y se mide el aumento de atenuación en dB/m. El aumento de la atenuación es la atenuación de la carga lateral de la guía de ondas en dB/m a una longitud de onda especificada (típicamente dentro del rango de 1200-1700 nm, por ejemplo, 1310 nm o 1550 nm o 1625 nm).

Otro tipo de prueba de flexión es la prueba de tambor de microcurvatura cubierta (WMCD) de la malla de alambre. En esta prueba, un tambor de aluminio de 400 mm de diámetro se envuelve con una malla de alambre. La malla se envuelve firmemente sin estirar y no debe tener agujeros, hundimientos ni daños. Especificación del material de malla de alambre: McMaster-Carr Supply Company (Cleveland, OH), número de pieza 85385T106, tela metálica tejida de acero inoxidable tipo 304 resistente a la corrosión, malla por pulgada lineal: 165x165, diámetro del alambre: 0,0019", ancho de apertura: 0,0041", % de área abierta: 44,0. Una longitud prescrita (750 metros) de fibra de guía de ondas se enrolla a 1 m/s en el tambor de malla de alambre a un paso de recogida de 0,050 centímetros mientras se aplica una tensión de 80 (+/- 1) gramos. Los extremos de la longitud de fibra prescrita se pegan con cinta adhesiva para mantener la tensión y que no haya cruces de fibra. La atenuación de la fibra óptica se mide a una longitud de onda especificada (típicamente dentro del rango de 1200-1700 nm, por ejemplo, 1310 nm o 1550 nm o 1625 nm); se mide una atenuación de referencia en la fibra óptica enrollada en un tambor liso. El aumento en la atenuación es la atenuación del tambor cubierto por una malla de alambre de la guía de ondas en dB/km a una longitud de onda especificada (típicamente dentro del rango de 1200-1700 nm, por ejemplo, 1310 nm o 1550 nm o 1625 nm).

Otro tipo de prueba de flexión es la prueba de pérdida microcurvatura basketweave. En la prueba de pérdida de microcurvatura basketweave, las fibras se enrollan a alta tensión en un carrete de vidrio y se exponen a un ciclo de temperatura. El aparato de prueba consta de un tambor de sílice de diámetro fijo. La superficie del tambor es lisa. En esta prueba, el diámetro del tambor es de 110 mm. La fibra se enrolla en el tambor de vidrio con una tensión de bobinado de 70 gramos y un paso de 2 mm (distancia entre vueltas adyacentes de fibra). Múltiples capas de fibra se envuelven con esta tensión y tono. Los ángulos de paso se invierten con cada capa enrollada. El cruce de las fibras tensadas de las capas adyacentes crea el mecanismo de microcurvatura. Se utiliza una longitud de fibra de 2,5 km. La medición de la atenuación de la fibra inicial se realiza a aproximadamente 23°, a aproximadamente el 45% de HR (humedad relativa) con la fibra desplegada en la configuración basketweave con 70 gramos de tensión. Las medidas iniciales de pérdida de atenuación se realizan a longitudes de onda de 1310 nm, 1550 nm y 1625 nm. Se utiliza un OTDR (reflectómetro óptico en el dominio del tiempo) para adquirir los datos de pérdida de atenuación.

Después de la medición inicial de pérdida de atenuación a 23 °C, la fibra se somete a ciclos térmicos. En el ciclo térmico, la fibra se enfría primero de 23 °C a -60 °C a una velocidad de 1 °C/min. La fibra se mantiene a -60 °C durante 20 horas y luego se calienta a una velocidad de 1 °C/min de nuevo a 23 °C. La fibra se mantiene a 23 °C durante 2 horas, luego se calienta a 70 °C a velocidad de 1 °C/min y se mantuvo a 70 °C durante 20 horas. A continuación, la fibra se enfría a 23 °C a una velocidad de 1 °C/min y se mantiene a 23 °C durante dos horas. Luego, la fibra se somete a un segundo ciclo térmico, que fue idéntico al primer ciclo térmico, es decir, se enfría de 23 °C a -60 °C, luego se calienta nuevamente a 23 °C, se mantiene a esa temperatura durante 2 horas y luego se calienta de 23 °C a 70 °C, luego de lo cual se enfría nuevamente a 23 °C. Finalmente, después de mantener la fibra a una temperatura de 23 °C durante dos horas, después del segundo ciclo, la fibra se vuelve a enfriar se enfría a -60 °C a una velocidad de 1 °C/min, se mantiene a -60 °C durante 20 horas y luego se enfría más a una velocidad de 1 °C/min a -60 °C. La fibra se mantiene a -60 °C durante 20 horas, luego se calienta a una velocidad de 1 °C/min de nuevo a 23 °C y se mantiene a 23 °C durante 2 horas. El ciclo térmico concluye en este punto.

Durante el ciclo térmico de la fibra, la pérdida de atenuación de la fibra se mide continuamente. Se determina la pérdida de atenuación máxima durante los dos ciclos térmicos hasta -60 °C, y aquí se informa la diferencia entre esta pérdida de atenuación máxima y la pérdida de atenuación inicial a 23 °C, como la pérdida de microcurvatura basketweave de la fibra a lo largo del intervalo de temperatura de -60 °C a 70 °C. En el ciclo térmico hasta -60 °C, la diferencia entre la pérdida de atenuación medida a -60 °C y la pérdida de atenuación inicial a 23 °C se informa aquí como la pérdida de microcurvatura basketweave de la fibra en el rango de temperatura de -60 °C a 23 °C.

La prueba de plegado "matriz de pines" se utiliza para comparar la resistencia relativa de la fibra de guía de ondas a la flexión. Para realizar esta prueba, se mide la pérdida de atenuación para una fibra de guía de ondas sin esencialmente pérdida por flexión inducida. La fibra de la guía de ondas luego se teje alrededor de la matriz de pines y se mide nuevamente la atenuación. La pérdida inducida por flexión es la diferencia entre las dos atenuaciones

medidas. La matriz de pines es un conjunto de diez pines cilíndricos dispuestos en una sola fila y mantenidos en una posición vertical fija sobre una superficie plana. El espacio entre pines es de 5 mm, de centro a centro. El diámetro del pin es de 0,67 mm. Durante la prueba, se aplica suficiente tensión para hacer que la fibra de la guía de ondas se adapte a una parte de la superficie del pin. El aumento de la atenuación es la atenuación de la matriz de pines en dB de la guía de ondas a una longitud de onda especificada (típicamente dentro del rango de 1200-1700 nm, por ejemplo, 1310 nm o 1550 nm o 1625 nm).

La longitud de onda teórica de fibra de corte, o "punto de corte de fibra teórico", o "punto de corte teórico", para un modo dado, es la longitud de onda por encima de la cual la luz guiada no puede propagarse en ese modo. Se puede encontrar una definición matemática en Single Mode Fiber Optics, Jeunhomme, págs. 39-44, Marcel Dekker, Nueva York, 1990, donde el corte teórico de la fibra se describe como la longitud de onda a la que la constante de propagación del modo se vuelve igual a la constante de propagación de la onda plana en el revestimiento exterior. Esta longitud de onda teórica es apropiada para una fibra infinitamente larga y perfectamente recta que no tiene variaciones de diámetro.

El punto de corte de la fibra se mide por la prueba estándar de corte de fibra de 2 m, FOTP-80 (EIA-TIA-455-80), para producir la "longitud de onda de corte de la fibra", también conocido como el "punto de corte de fibra de 2m" o "punto de corte medido". La prueba estándar FOTP-80 se realiza para eliminar los modos de orden superior utilizando una cantidad controlada de flexión o para normalizar la respuesta espectral de la fibra a la de una fibra multimodo.

Por longitud de onda de corte cableada, "cable de corte", 'longitud de onda de corte de cable', o 'punto de corte cableado' como se usa en este documento, nos referimos a la longitud de onda de corte de cable determinada por la prueba de corte cableada de 22 m se describe en EIA-445 Procedimientos de prueba de fibra óptica, que forman parte de los estándares de fibra óptica EIA-TIA, es decir, los estándares de fibra óptica de la Alianza de la industria electrónica - Asociación de la industria de telecomunicaciones,

A menos que se indique lo contrario en este documento, se informa propiedades ópticas (tales como la dispersión, la pendiente de dispersión, etc.) para el modo LP01.

Las fibras ópticas descritas en este documento son capaces de exhibir un área efectiva a 1550 nm que es mayor que aproximadamente 70 micrómetros <sup>2</sup>, en algunas realizaciones entre 75 y 95 micrómetros <sup>2</sup>, por ejemplo, entre aproximadamente 80 y 90 micrómetros <sup>2</sup>. En algunas realizaciones, el área efectiva del modo óptico a 1550 nm está entre aproximadamente 82 y 88 micrómetros <sup>2</sup>.

Las realizaciones de la fibra 110 (véase, por ejemplo, la FIG. 8) incluyen un núcleo 112 que comprende un porcentaje delta del índice de refracción máximo  $\Delta_1$  y un revestimiento 120 que rodea el núcleo 112. En al menos algunas realizaciones descritas en este documento, el núcleo alfa es mayor que 5 (es decir,  $\alpha > 5$ ). De acuerdo con los ejemplos de realizaciones descritos en este documento, la fibra 110 es preferiblemente una fibra monomodo.

El revestimiento 120 incluye una zona de revestimiento interior 121 que está en contacto con y rodea el núcleo 112, una región índice de revestimiento deprimido 122 (también referido como una región de separación en el presente documento) que rodea la región de revestimiento interior 121. La región de revestimiento 122 tiene un índice de refracción delta por ciento  $\Delta_3$ . La región 124 de revestimiento exterior rodea la región de separación 122 y comprende un porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_4$ . Una región de separación es una región de índice de refracción bajo, rodeada por las regiones de índice de refracción más alto. Como se muestra, por ejemplo, en la FIG. 8, la región de separación 122 dentro del revestimiento 120 está rodeada por dos regiones de revestimiento de índice más alto, es decir, las regiones de revestimiento 121 y 124.

En las realizaciones descritas en el presente documento  $\Delta_{1max} > \Delta_4$ ;  $\Delta_3 < \Delta_2$ ; y  $\Delta_4 > \Delta_3$ . En las realizaciones ilustradas en las FIGS. 8 a 14, las regiones de revestimiento 121, 122 y 124 son inmediatamente adyacentes entre sí. Sin embargo, esto no es necesario y, alternativamente, se pueden emplear regiones de revestimiento adicionales. El núcleo 112 comprende un radio exterior  $r_1$  (que se define como donde una línea tangente trazada a través de la pendiente máxima del porcentaje delta del índice de refracción del núcleo central 112 que cruza la línea de cero delta) que está entre 2,75 y 6 micrómetros, en algunas realizaciones entre aproximadamente 3 y 5,75 micrómetros, por ejemplo entre 3,5 y 5,6 micrómetros, y en algunas realizaciones 4-5 micrómetros. El núcleo 112 exhibe un porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_1$ , (relativo a la sílice pura). Por ejemplo, el índice de refracción máximo delta del núcleo,  $\Delta_{1max}$ , puede ser del 0 por ciento (si está hecho de sílice pura) a 0,65 por ciento, o entre 0,15 y 0,5 por ciento, y en algunas realizaciones entre aproximadamente 0,2 y 0,5 por ciento. En algunas realizaciones  $\Delta_{1max} \geq 0,38$ , por ejemplo  $0,5 \geq \Delta_{1max} \geq 0,38$ .

En algunas realizaciones, el núcleo 112 presenta un alfa núcleo ( $\alpha$ ) donde,  $\alpha$  es mayor que 5, por ejemplo, al menos 10. En algunas realizaciones, el núcleo alfa es 15 o más. En algunas realizaciones, el núcleo 112 puede comprender un alfa entre aproximadamente 10 y 100, por ejemplo, en algunas realizaciones el núcleo alfa,  $\alpha$ , puede estar entre 15 y 100, y en algunas realizaciones entre 15 y 40. Un perfil de índice de refracción de un ejemplo de realización de fibra con  $\alpha_1$  de aproximadamente 20 se muestra, por ejemplo, en la FIG. 8.

En las realizaciones ilustradas en la FIG. 10-14, la región de revestimiento interior 121 es adyacente al núcleo 112 y comprende un radio interior  $r_1$  y un radio exterior  $r_2$ . La región 121 de revestimiento interior presenta preferiblemente un porcentaje delta de índice de refracción,  $\Delta_2 \leq 0,3$  (en relación con la sílice pura). Como se indicó anteriormente,  $\Delta_1 \geq \Delta_2$ . En los ejemplos de realizaciones descritos en este documento, el  $0,15\% \leq \Delta_{1\max} - \Delta_2 \leq 0,5\%$ , por ejemplo  $0,2\% < \Delta_{1\max} - \Delta_2 < 0,4\%$ , o  $0,25\% < \Delta_{1\max} - \Delta_2 < 0,35$ . En algunas realizaciones  $\Delta_2$  es de 0 a 0,3 por ciento, por ejemplo, entre aproximadamente 0 y 0,25 por ciento, o entre 0,1 y 0,2 por ciento. Alternativamente, por ejemplo, si la región del núcleo 112 (también denominada núcleo en el presente documento) está hecha de sílice pura, la región de revestimiento interno 121 se dobla hacia abajo con respecto a la sílice pura, de modo que  $\Delta_{1\max} - \Delta_2 \leq 0,5$  por ciento. El radio exterior  $r_2$  de la región de revestimiento interior 121 es de entre 5 y 17 micrómetros, en algunas realizaciones entre aproximadamente 7 y 15 micrómetros, por ejemplo, de 6 a 12 micrómetros, o de 6 a 10 micrómetros. En algunas realizaciones, la relación de  $r_2 / r_1$  es  $> 1,2$ . En algunas realizaciones, la relación de  $r_2 / r_1$  es  $\geq 1,25$ , por ejemplo  $1,25 \geq r_2 / r_1 \geq 2,5$ . En al menos algunos ejemplos de realizaciones descritos en este documento  $1,6 \geq r_2 / r_1 \geq 2,4$ . En al menos algunos ejemplos de realizaciones descritos en este documento  $1,8 \geq r_2 / r_1 \geq 2,35$ . Los valores anteriores del radio  $r_1$ , la diferencia entre  $\Delta_{1\max}$  y  $\Delta_2$ , y la relación  $r_2 / r_1$  ayudan a que las fibras tengan  $1300 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1324 \text{ nm}$  y MFD entre 8,2 micrómetros y 9,5 micrómetros en la longitud de onda de 1310 nm.

La zona de separación 122 (también referido como región de revestimiento del índice deprimido en el presente documento) rodea la región de revestimiento interior 121. La región de separación 122 tiene un porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_3$  que es más pequeño que  $\Delta_2$ . En algunas realizaciones  $\Delta_3$  es  $-0,4\% \leq \Delta_3 \leq 0,1\%$ . Por ejemplo, en algunas realizaciones, la separación está formada por sílice pura, y  $\Delta_3$  es 0. En algunas realizaciones, el porcentaje delta del índice de refracción relativo en la región de separación 122 es esencialmente plano, es decir, la diferencia entre el porcentaje delta del índice de refracción relativo en dos radios cualesquiera dentro de la región de separación 122 es inferior al 0,03%, y en algunas realizaciones inferior al 0,01%. En otras realizaciones, puede haber fluctuaciones como resultado de un diseño de perfil pequeño o variaciones de proceso. En algunas realizaciones, la región de separación 122 comprende sílice que está sustancialmente sin dopar con flúor o germania, es decir, de manera que la región está esencialmente libre de flúor y germania, es decir, menos de 0,1% en peso de F o GeO<sub>2</sub>. En algunas realizaciones, la región de separación es sílice pura, en otras realizaciones es sílice dopada con flúor, para hacer  $-0,4\% \leq \Delta_3 \leq 0,1\%$ . En algunas realizaciones,  $0,35\% \leq \Delta_{1\max} - \Delta_3 \leq 0,65\%$ .

La región de separación 122 preferentemente presenta una anchura  $W_t$  (donde  $W_t = r_3 - r_2$ ) entre aproximadamente 4 micrómetros y 22 micrómetros, en algunas realizaciones, de entre 8 y 20 micrómetros. En algunas realizaciones, el radio exterior  $r_3$  de la región de separación puede ser no menos de 10 micrómetros, por ejemplo, mayor que 12 micrómetros y menos de 27 micrómetros, o alrededor de 14,5 micrómetros a aproximadamente 25,5 micrómetros con el fin de lograr un buen rendimiento de flexión y de corte de cable de  $\leq 1260 \text{ nm}$ .

Zona de revestimiento exterior 124 rodea a la zona de separación 122 y comprende el porcentaje delta del índice de refracción de  $\Delta_4$  que es más alto que el porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_3$  de la región de separación 122, formando así una región que es una región de revestimiento exterior 124 "mejorado" con respecto a la región de revestimiento 122 del índice deprimido, por ejemplo, añadiendo una cantidad de dopante (como germania o cloro) suficiente para aumentar el índice de refracción de la región de revestimiento exterior. En algunas realizaciones, no hay flúor u otros dopantes hacia abajo en la región 122 de la separación, y la región 124 de revestimiento exterior comprende un mejorante, por ejemplo, cloro. En algunas realizaciones, la concentración de cloro en la región de revestimiento exterior 124 es  $\geq 1\%$  en peso. En algunas otras realizaciones, la concentración de cloro en la región de revestimiento exterior 124 es  $\geq 1,2\%$  en peso. En otras realizaciones más, la concentración de cloro en la región de revestimiento exterior 124 es  $\geq 1,5\%$  en peso. En otras realizaciones más, la concentración de cloro en la región de revestimiento exterior 124 es  $\geq 2\%$  en peso.

La región de revestimiento exterior 124 comprende un índice de refracción mayor que el de la región de separación 122, y puede, por ejemplo, tener un porcentaje de índice de refracción delta  $\Delta_4$  que está entre 0,12% y 0,4%. En algunas realizaciones  $0,12\% \leq \Delta_4 - \Delta_3 \leq 0,4\%$ , por ejemplo, en algunas realizaciones  $0,12\% < \Delta_4 - \Delta_3 < 0,3\%$ . En algunas realizaciones, la región de revestimiento exterior 124 está compuesta por una primera región de revestimiento exterior 123 (con un radio exterior  $r_{3a}$ ) y una segunda región de revestimiento exterior 125 (con un radio exterior  $r_4$ ), donde la primera región 123 de revestimiento exterior tiene una concentración de cloro de  $\geq 1,2\%$  en peso de  $R_3$  a 40 micrómetros. En algunas realizaciones, la primera región de revestimiento exterior 123 tiene una concentración de cloro de  $\geq 1,5$  en peso %, de  $R_3$  a 40 micrómetros, y en algunas realizaciones, la primera región de revestimiento exterior 123 tiene una concentración de cloro de  $\geq 2$  en peso %, de  $R_3$  a 40 micrómetros.

En algunas realizaciones, la segunda región de revestimiento exterior 125 tiene una viscosidad más alta que la primera capa de revestimiento exterior. Es decir, la viscosidad del vidrio de la segunda región de revestimiento exterior 125 es mayor que la viscosidad del vidrio de la primera región de revestimiento exterior 123. En esta realización, la segunda región de revestimiento exterior 125 es la capa absorbente de tensión. En algunas realizaciones, la segunda región de revestimiento exterior 125 tiene una concentración de cloro de  $\leq 0,5\%$  en peso

de  $r_{4a}$  a  $r_4$  (donde  $r_{4a}$  es el radio exterior del alto (p. ej.,  $\leq 1,2\%$  en peso de Cl) en la región dopada, como se muestra, por ejemplo, en la FIG. 9, y  $r_4$  es el radio exterior de la fibra óptica de vidrio, por ejemplo, de 62,5 micrómetros). En algunas realizaciones, la segunda región de revestimiento exterior 125 tiene una concentración de cloro de  $\leq 0,25\%$  en peso desde su radio interior  $r_{4a}$  hasta el radio exterior  $r_4$ . En algunas realizaciones, la segunda región de revestimiento exterior tiene una concentración de cloro, [Cl], de  $0,0\%$  en peso [Cl]  $\leq 0,2$  en % en peso de  $r_{4a}$  a  $r_4$ . En algunas realizaciones,  $40$  micrómetros  $\leq r_{4a} \leq 55$  micrómetros, por ejemplo,  $r_{4a}$  está en 40 micrómetros, 45 micrómetros, 50 micrómetros, o 55 micrómetros. Preferiblemente, la parte de índice más alto (en comparación con la región de separación 122) de la región de revestimiento exterior 124 se extiende al menos hasta el punto donde la potencia óptica que se transmitiría a través de la fibra óptica es mayor o igual al 90% de la potencia óptica transmitida, más preferiblemente hasta el punto donde la potencia óptica que se transmitiría a través de la fibra óptica es mayor o igual al 95% de la potencia óptica transmitida, y más preferiblemente hasta el punto donde la potencia óptica que se transmitiría a través de la fibra óptica es mayor igual o superior al 98% de la potencia óptica transmitida, que se prefiere para lograr un buen rendimiento de plegado y un corte de cable de  $\leq 1260$  nm. En algunas realizaciones, esto se logra haciendo que la tercera región anular "doblada hacia arriba" (es decir, la primera región de revestimiento exterior 123) se extienda al menos hasta un punto radial de aproximadamente 30 micrómetros. En algunas realizaciones, la tercera región anular 123 "doblada hacia arriba" se extiende al menos hasta un punto radial de aproximadamente 40 micrómetros, con una cuarta región anular (es decir, la segunda región de revestimiento exterior 125) que comprende esencialmente sílice que rodea la tercera región anular. En algunas realizaciones, el revestimiento 120 tiene un diámetro exterior de 2 veces el radio máximo,  $R_{max}$ , de aproximadamente 125 micrómetros. Como se muestra en la FIG. 9, la región 123 dopada (es decir, la primera región de revestimiento exterior) del revestimiento exterior 124, tiene un porcentaje delta del índice de refracción de  $\Delta_4$  y la región de revestimiento 125 (es decir, la segunda región de revestimiento exterior) tiene un porcentaje delta del índice de refracción de  $\Delta_5$ , y  $\Delta_4 > \Delta_5$ .

El volumen de perfil  $V_3$  de la región de separación 122, se calcula usando  $\Delta_{(4-3)}(r)$  rdr entre el radio  $r_2$  y  $r_3$ , y por lo tanto se define en la ecuación 3 como

$$V_3 = 2 \int_{r_2}^{r_3} \Delta_{(4-3)}(r) r dr$$

Eq. 3

Todos los volúmenes están en magnitudes absolutas (es decir,  $V_3 = |V_3|$ ). Con el fin de lograr un buen rendimiento por curvatura, el volumen  $V_3$  de la región de separación 122 es preferiblemente mayor que  $30\% \Delta$ micrómetros<sup>2</sup>, y puede ser superior al  $45\% \Delta$ micrómetros<sup>2</sup>, y en algunas realizaciones es superior al  $50\% \Delta$ micrómetros<sup>2</sup>, y en algunas realizaciones puede ser superior al  $55\% \Delta$ micrómetros<sup>2</sup>. En algunas realizaciones, el volumen  $V_3$  de la región de separación 122 es  $30\% \Delta$ micrómetros<sup>2</sup> a  $90\% \Delta$ micrómetros<sup>2</sup>, por ejemplo  $40$  a  $80\% \Delta$ micrómetros<sup>2</sup>.

En los ejemplos de realización descrita en este documento el núcleo 112 tiene un índice de refracción positiva a lo largo. La región del núcleo 112 comprende un porcentaje delta de índice de refracción máximo  $\Delta_1$  máx. Que se produce entre  $r = 0$  y  $r = 3$  micrómetros. En estas realizaciones  $\Delta_{1max}$  está entre aproximadamente el  $0,38\%$  y aproximadamente el  $0,5\%$ .

Las fibras son capaces de exhibir una pérdida por curvatura menor que  $0,5$  dB/vuelta cuando se enrollan en un mandril de  $15$  mm de diámetro para fibras con números MAC  $\geq 7,25$ . En algunas realizaciones, las fibras ópticas descritas en este documento tienen un número MAC de  $\geq 7,6$  o incluso  $\geq 7,7$  y en algunos ejemplos,  $7,6 \geq MAC \geq 8$ , y una longitud de onda de dispersión cero,  $\lambda_0$  de  $1324$  nm  $\geq \lambda_0 \geq 1300$  nm. Como se usa en este documento, el número MAC significa el diámetro del campo de modo a  $1310$  (nm) dividido entre el corte de cable de  $22$  m de longitud de onda (nm).

Las fibras descritas en el presente documento pueden extraerse a partir de preformas de fibra óptica hechas usando técnicas de fabricación convencionales y utilizando métodos de estiramiento de fibras y aparatos conocidos, por ejemplo, como se describe en la Patente de Estados Unidos N°  $7,565,820$ ,  $5,410,567$ ,  $7,832,675$ ,  $6,027,062$ .

Diversos ejemplos de realizaciones se clarificarán adicionalmente mediante los siguientes ejemplos. Será evidente para los expertos en la técnica que se pueden realizar diversas modificaciones y variaciones sin apartarse del espíritu o alcance de las reivindicaciones.

**Ejemplos**

La Tabla 1 a continuación enumera las características de los ejemplos 1-3 de realizaciones de fibras. Estas realizaciones de fibra tienen perfiles de índice de refracción como se muestra en las FIGS. 10-12. En particular, se establece a continuación para cada ejemplo el porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_1$ , alfa 1 ( $\alpha_1$ ), y el radio exterior  $r_1$  del núcleo 112; porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_2$ , y el radio exterior  $r_2$  de la región de

## ES 2 889 949 T3

5

revestimiento interior 121; y porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_3$ , y el radio exterior  $r_3$ , así como el volumen de perfil V3 de la zona de separación 122, que se calcula entre  $r_2$  y  $r_3$ ; porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_4$ . También se indica la dispersión cromática y la pendiente de dispersión a 1310 nm, dispersión cromática y pendiente de dispersión a 1550 nm, diámetro del campo modal a 1310 nm y 1550 nm, microcurvatura de malla de alambre de carga lateral a 1550 nm, macrocurvatura de matriz de pines a 1550 nm, longitud de onda de dispersión cero ( $\lambda_0$ ), corte de cable de 22 m, número MAC a 1310 nm, pérdida por curvatura de 1 x 15 mm de diámetro (pérdida por curvatura cuando la fibra se gira una vez alrededor de un mandril de 15 mm de diámetro) y atenuación espectral a 1310 y 1550 nm.

Tabla 1

Parámetro	Ej 1	Ej 2	Ej 3
$\Delta 1$ máx. (%)	0,47	0,47	0,45
$r_1$ (micrómetro)	4,3	4,3	4,3
Región 12 núcleo alfa	20	20	20
$\Delta 2$ (%)	0,15	0,15	0,15
$\Delta 1 - \Delta 2$	0,32	0,32	0,30
$r_2$ (micrómetro)	10	9	8,1
Parámetro	Ej 1	Ej 2	Ej 3
$r_2/r_1$	2,3	2,1	1,9
$\Delta 3$ (%)	0,00	0,00	0,00
$\Delta 2 - \Delta 3$	0,15	0,15	0,15
$r_3$ (micrómetro)	20	19,5	20
$\Delta 4$ (%)	0,15	0,15	0,15
$r_4$ (micrómetro)	62,5	62,5	62,5
Concentración máxima de cloro en la región de revestimiento exterior 124, % en peso	1,5	1,5	1,5
$\Delta 4 - \Delta 3$	0,15	0,15	0,15
$V_3$ (% micrómetro <sup>2</sup> )	45	45	50
Dispersión a 1310 nm (ps/nm/km)	4,9E-04	0,346	0,25
Pendiente de dispersión a 1310 nm (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0,088	0,099	0,091
$\lambda_0$ , nm	1318	1315	1315
Dispersión a 1550 nm (ps/nm/km)	17,5	18	18
Dispersión en la pendiente a 1550 nm (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0,062	0,062	0,063
MFD a 1310 nm (micrómetros)	9,2	9,16	9,25
MFD a 1550 nm (micrómetros)	10,44	10,34	10,38
LLWM @ 1550 nm, dB/m	0,6	0,56	0,77
WMCD a 1550 nm, dB/km	0,04	0,04	0,04
Matriz de pines a 1550 nm, dB	14,9	15,0	23,9
Corte de cable (nm)	1206	1206	1200
$A_{eff}$ a 1310 nm (micrómetros <sup>2</sup> )	66,5	65,9	67,2
$A_{eff}$ a 1550 nm (micrómetros <sup>2</sup> )	85,6	84,0	84,6
MAC # (MFD a 1310 nm/corte de cable)	7,63	7,60	7,71
Pérdida por curvatura de 1x15 mm de diámetro a 1550 nm (dB/vuelta)	0,19	0,2	0,29
Pérdida por curvatura de 1x20 mm de diámetro a 1550 nm (dB/vuelta)	0,047	0,047	0,074
Pérdida por curvatura de 1x30 mm de diámetro a 1550 nm	0,0045	0,0045	0,01

## ES 2 889 949 T3

Parámetro	Ej 1	Ej 2	Ej 3
(dB/vuelta)			
Attn a 1550 nm, dB/km	0,18	0,18	0,18
Attn a 1310 nm, dB/km	0,32	0,32	0,32

5 Como se puede observar en la Tabla 1 anterior, los ejemplos de fibras mostrados en la Tabla 1 emplean una región de núcleo de vidrio 112 que tiene un índice  $\Delta_1$ , una región de revestimiento interior 121 que tiene un índice  $\Delta_2$ , y la región de separación de revestimiento 122 que tiene un porcentaje delta del índice de refracción de  $\Delta_3$ , y una región de revestimiento exterior 124 que tiene un porcentaje delta de índice de refracción de  $\Delta_4$ ; donde  $\Delta_{1max} > \Delta_2$ ;  $\Delta_{1max} > \Delta_4$ ;  $\Delta_3 > \Delta_2$ ;  $\Delta_4 > \Delta_3$ , donde la diferencia entre  $\Delta_{1max}$  y  $\Delta_2$  es mayor o igual a al menos 0,15, diferencia entre  $\Delta_{1max}$  y  $\Delta_3$  es mayor o igual que al menos 0,35 (p. ej.,  $0,38 \leq \Delta_{1max} - \Delta_3 \leq 0,65$ ); la diferencia entre  $\Delta_2$  y  $\Delta_3$  es mayor o igual que al menos 0,08 (p. ej.,  $0,08 \leq \Delta_3 - \Delta_2 \leq 0,4$ ); y la diferencia entre  $\Delta_4$  y  $\Delta_3$  es mayor o igual a al menos 0,08 (por ejemplo,  $0,1 \leq \Delta_4 - \Delta_3 \leq 0,4$ , o  $0,1 \leq \Delta_4 - \Delta_3 \leq 0,3$ ); y el valor absoluto del volumen del perfil,  $|V_3|$  es de al menos 30% micrómetros<sup>2</sup>. Estas fibras tienen diámetros de campo modal (MFD) a 1310 nm entre 9 micrómetros y 9,5 micrómetros, por ejemplo, entre 9,2 micrómetro y 9,5 micrómetro y una longitud de onda de dispersión cero entre 1300 nm y 1324 nm.

15 La Tabla 2 a continuación enumera las características de una realización del ejemplo 4 de fibra. Estas realizaciones de fibra tienen el perfil de índice de refracción como se muestra en la FIG. 13.

Tabla 2

Parámetro	Ej 4
$\Delta_1$ máx. (%)	0,53
$r_1$ (micrómetro)	4,4
Región12 núcleo alfa	20
$\Delta_2$ (%)	0,2
$\Delta_1 - \Delta_2$	0,33
$r_2$ (micrómetro)	10
$r_2/r_1$	2,27
$\Delta_3$ (%)	0,00
$\Delta_2 - \Delta_3$	0,2
$r_3$ (micrómetro)	18,2
$\Delta_4$ (%)	0,2
$r_{4a}$ (micrómetro)	45
Concentración máxima de cloro en la región de revestimiento exterior 124, % en peso	2
$\Delta_4 - \Delta_3$	0,2
$\Delta_5$ (%)	0
$r_4$ (micrómetro)	62,5
$V_3$ (% micrómetro <sup>2</sup> )	46,2
Dispersión a 1310 nm (ps/nm/km)	0,483
Pendiente de dispersión a 1310 nm (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0,089
Lambda cero, nm	1312
Dispersión a 1550 nm (ps/nm/km)	18,1
Dispersión en la pendiente a 1550 nm (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0,062
MFD a 1310 nm (micrómetros)	9,16
MFD a 1550 nm (micrómetros)	10,31

Parámetro	Ej 4
LLWM @ 1550 nm, dB/m	0,4
WMCD a 1550 nm, dB/km	0,04
Matriz de pines a 1550 nm, dB	8,96
Corte de cable (nm)	1257
Aeff a 1310 nm (micrómetros <sup>2</sup> )	66,1
Aeff a 1550 nm (micrómetros <sup>2</sup> )	81,7
MAC # (MFD a 1310 nm/corte de cable)	7,29
Pérdida por curvatura de 1x15 mm de diámetro a 1550 nm (dB/vuelta)	0,102
Pérdida por curvatura de 1x20 mm de diámetro a 1550 nm (dB/vuelta)	0,023
Pérdida por curvatura de 1x30 mm de diámetro a 1550 nm (dB/vuelta)	0,002
Attn a 1550 nm, dB/km	0,18
Attn a 1310 nm, dB/km	0,32

Como se puede observar en la Tabla 2 anterior, los ejemplos de fibras como la representada en la FIG. 9 y la FIG. 13 emplean una región de núcleo de vidrio 112 que tiene un porcentaje delta del índice de refracción  $\Delta_{1max}$ , una región de revestimiento interior 121 que tiene un porcentaje delta del índice de refracción de  $\Delta_2$ , y la región de separación 122 con porcentaje delta del índice de refracción de  $\Delta_3$ , y una primera región 123 de revestimiento exterior que tiene un porcentaje delta de índice de refracción  $\Delta_4$  y una segunda región de revestimiento exterior 125 que tiene un porcentaje delta del índice de refracción de  $\Delta_5$ ; donde  $\Delta_{1max} > \Delta_2$ ;  $\Delta_{1max} > \Delta_4$ ;  $\Delta_3 > \Delta_2$ ;  $\Delta_4 > \Delta_3$ , donde la diferencia entre  $\Delta_{1mx}$  y  $\Delta_2$  es mayor o igual a al menos 0,15, diferencia entre  $\Delta_{1max}$  y  $\Delta_3$  es mayor o igual que al menos 0,35 (p. ej.,  $0,38 \leq \Delta_{1mac} - \Delta_3 \leq 0,65$ ); la diferencia entre  $\Delta_2$  y  $\Delta_3$  es mayor o igual que al menos 0,08 (p. ej.,  $0,08 \leq \Delta_2 - \Delta_3 \leq 0,4$ ); y la diferencia entre  $\Delta_4$  y  $\Delta_3$  es mayor o igual a al menos 0,08 (p. ej.,  $0,1 \leq \Delta_4 - \Delta_3 \leq 0,4$  o  $0,1 \leq \Delta_4 - \Delta_3 \leq 0,3$ ); y un valor absoluto del volumen del perfil,  $|V_3|$  de al menos 30% micrómetros<sup>2</sup>. En esta realización, la región de revestimiento 125 es una capa de sílice con un porcentaje de índice de refracción relativo de aproximadamente cero. La región de revestimiento 125 (es decir, la segunda región de revestimiento exterior) actúa como una capa rígida que absorbe la tensión. Esta realización de fibra tiene un diámetro de campo modal (MFD) a 1310 nm entre 9 micrómetros y 9,5 micrómetros, y una longitud de onda de dispersión cero entre 1300 nm y 1324 nm.

Las realizaciones de fibra descritas en este documento presentan un punto de corte de cable de menos de o igual a 1,260 nm y una pérdida por curvatura de menos de 0,5 dB/vuelta cuando se enrolla sobre un mandril de 15 mm de diámetro. Estas fibras también exhiben un diámetro de campo modal entre aproximadamente 9 y 9,5 micrómetros a 1310 nm, una longitud de onda de dispersión cero entre 1300 y 1324 nm, una pendiente de dispersión a 1310 nm que es menor o igual a 0,092 ps/nm<sup>2</sup>/km. Estas fibras exhiben una pérdida por curvatura del tambor cubierto de malla de alambre (WMCD) a 1550 nm que es menor o igual a 0,07 dB/km, en algunas realizaciones menor o igual a 0,06 dB/km y, en algunas realizaciones, menor o igual que 0,05 dB / km. Estas fibras también exhiben una pérdida por curvatura de la matriz de pines a 1550 nm que es menos de 8,5 dB, en algunas realizaciones menos de 5 dB y en algunas realizaciones menos de 4 dB. Estas fibras exhiben una pérdida por microcurvatura de Basketweave a 1550 nm que es menor o igual a 0,05 dB / km, en algunas realizaciones menor o igual a 0,025 dB / km, y en algunas realizaciones menor o igual a 0,01 dB / km.

Muchas de estas fibras también presentan una pérdida por curvatura a 1550 nm, cuando se enrollan sobre un mandril de 15 mm de diámetro, de menos de 0,5 dB /vuelta, y en algunos casos menos de 0,2 dB / vuelta. Estas fibras también exhiben una pérdida por curvatura a 1550 nm, cuando se enrollan en un mandril de 20 mm de diámetro, de menos de 0,2 dB /vuelta, en algunas realizaciones de menos de 0,15 dB /vuelta, y algunas fibras en algunas realizaciones de menos de 0,1 dB /vuelta. Estas fibras también exhiben una pérdida por curvatura a 1550 nm, cuando se enrollan en un mandril de 30 mm de diámetro, de menos de 0,02 dB/vuelta, por ejemplo, menos de 0,005 dB/vuelta, o incluso menos de 0,003 dB/vuelta.

Dichas pérdidas por curvatura y números de rendimiento de atenuación son alcanzables mediante un revestimiento primario y secundario aplicado a la fibra, donde el módulo de Young del primario es inferior a 2 MPa, en algunas realizaciones menos de 1 MPa, y en algunas realizaciones menos de 0,5 MPa. El módulo de Young del revestimiento secundario es mayor de 500 MPa, en algunas realizaciones mayor de 1000 MPa y en algunas realizaciones mayor de 1500 MPa. En algunas realizaciones, el diámetro exterior del revestimiento secundario es de 242 micrómetros. En algunas otras realizaciones, el diámetro exterior del revestimiento secundario es de 200

micrómetros.

La Tabla 3 proporciona datos de una realización de fibra óptica fabricada (fibra del ejemplo 5). El perfil del índice de refracción de la fibra óptica del ejemplo 5 se ilustra en la FIG. 14.

5

**Tabla 3. Datos para fibra óptica fabricada**

Parámetro	Ej 5
$\Delta 1$ máx. (%)	0,48
$r_1$ (micrómetros)	4,87
Núcleo alfa $\alpha$	20
$r_2$ (micrómetros)	6,11
$r_2/r_1$	1,25
$\Delta 2$ (%)	0,153
$r_3$ (micrómetros)	19,8
$\Delta 3$ (%)	0
$V_3$ (% $\Delta$ micrómetros <sup>2</sup> )	60
$\Delta 4$ (%)	0,168
Conc. de cloro en la zona de revestimiento exterior 124, % en peso	1,7
$r_4$ (micrómetros)	62,5
Dispersión a 1310 nm (ps/nm/km)	0,565
Pendiente de dispersión a 1310 nm (ps/nm <sup>2</sup> /km)	0,091
Parámetro	Ej 5
Dispersión a 1550 nm (ps/nm/km)	18,1
Longitud de onda de dispersión cero (nm)	1304
MFD a 1310 nm (micrómetros)	9,34
MFD a 1550 nm (micrómetros)	10,45
$A_{\text{eff}}$ a 1550 nm (micrómetros <sup>2</sup> )	85,8
Corte de cable (nm)	1204
Pérdida por macrocurvatura para mandril de 15 mm de diámetro a 1550 nm (dB / vuelta)	0,078
Pérdida por macrocurvatura para mandril de 20 mm de diámetro a 1550 nm (dB / vuelta)	0,084
Pérdida por macrocurvatura para mandril de 30 mm de diámetro a 1550 nm (dB / vuelta)	0,005
Pérdida de microcurvatura a 1550 nm en la prueba de tejido de cesta a -60 C para un diámetro de recubrimiento de 242 micrómetros (dB / km)	0,005
Pérdida de microcurvatura a 1550 nm en la prueba de tejido de cesta a -60 C para un diámetro de recubrimiento de 200 micrómetros (dB / km)	0,03
Pérdida de microcurvatura a 1550 nm en la prueba de tejido de cesta a -60 C para un diámetro de recubrimiento de 200 micrómetros (dB / km)	0,03

En la realización de la Tabla 3, las fibras ópticas presentan una pérdida microcurvatura basketweave a -60 ° C a 1550 nm que es menor que o igual a 0,05 dB / km, por ejemplo, menos de o igual a 0,03 dB / km.

10 En algunas realizaciones, el núcleo de fibra puede comprender un perfil de índice de refracción relativo que tiene un denominado caída de línea central que puede ocurrir como resultado de una o más técnicas de fabricación de fibras ópticas. Sin embargo, la caída de la línea central en cualquiera de los perfiles de índice de refracción descritos en este documento es opcional.

15 La fibra óptica descrita en este documento comprende un núcleo 112 y un revestimiento 120 que rodea y directamente adyacente al núcleo. Según algunas realizaciones, el núcleo está compuesto de sílice dopada con germanio, es decir, sílice dopada con germania. Pueden emplearse dopantes distintos del germanio, solos o en combinación, dentro del núcleo, y particularmente en o cerca de la línea central, de la fibra óptica descrita en este documento para obtener el índice de refracción y la densidad deseados. En realizaciones, la región 112 del núcleo

de la fibra óptica 110 descrita en este documento tiene un perfil de índice de refracción no negativo, más preferiblemente un perfil de índice de refracción positivo, con la región de revestimiento interior 121 rodeando y directamente adyacente a la región 112 del núcleo.

5 En diversas realizaciones descritas en este documento, las fibras ópticas incluyen una o más capas protectoras (por ejemplo, capas de polímero) situado fuera de y la región circundante revestimiento exterior 124, y en al menos algunas realizaciones, estas capas de protección están configuradas para proporcionar resistencia a la perforación de la fibra óptica. Por ejemplo, la fibra óptica descrita en el presente documento puede estar rodeada por un revestimiento protector, por ejemplo, un revestimiento primario P que contacta y rodea la región de revestimiento exterior 124. En varias realizaciones, el revestimiento primario P tiene un módulo de Young de menos de 1,0 MPa, en algunas realizaciones, menos de 0,9 MPa, y en algunas realizaciones no más de 0,8 MPa. En varias realizaciones, las fibras ópticas discutidas en el presente documento incluyen además un revestimiento secundario S que contacta y rodea el revestimiento primario P. En varias realizaciones, el revestimiento secundario S tiene un módulo de Young superior a 1200 MPa, y en algunas realizaciones superior a 1400 MPa. En algunas realizaciones, las fibras ópticas discutidas en este documento incluyen un revestimiento primario P que tiene un módulo de elasticidad intrínseco menor de 0,5 MPa, específicamente menor de 0,2 MPa e incluso más preferiblemente menor de 0,15 MPa, mientras que la temperatura de transición vítrea está entre -25 y -35 ° C, y en algunas de tales realizaciones, el diámetro del revestimiento primario es preferiblemente menor de 165 µm, específicamente menor de 160 µm e incluso más específicamente menor de 150 µm, y en tales realizaciones, el diámetro del recubrimiento secundario es menor de 250 micrómetros y más específicamente es menos de 210 micrómetros. En varias realizaciones, el revestimiento secundario tiene un módulo de elasticidad mayor de 1200 MPa, específicamente mayor de 1500 MPa y más específicamente mayor de 1800 MPa. En realizaciones particulares, las fibras ópticas de diámetro reducido discutidas en este documento tienen revestimientos secundarios con módulo de elasticidad superior a 1700 MPa y tienen una carga de resistencia a la perforación superior a 25 g, como se muestra en la Tabla 4 a continuación. El método de prueba para la resistencia a la perforación del revestimiento de fibra óptica se puede encontrar en las Actas 52 del IWCS (Simposio internacional de alambres y cables), p. 237-245.

Tabla 4. Prueba de resistencia a la perforación para fibras ópticas de diámetro reducido

Fibra	Área de la sección transversal del recubrimiento secundario, micrómetros <sup>2</sup>	Carga mínima de perforaciones, gramos
1	9450	28,0
2	10912	26,8
3	11306	28,2

30 De acuerdo con algunas realizaciones, con revestimientos primarios y secundarios, el diámetro exterior del recubrimiento secundario es inferior a 250 micrómetros. Según algunas realizaciones, la fibra se recubre además con recubrimientos primarios y secundarios, y el diámetro exterior del recubrimiento secundario es inferior a 210 micrómetros.

35 Como se usa en el presente documento, el módulo de Young, alargamiento a la rotura, y resistencia a la tracción de un material polimérico curado de un recubrimiento primario se mide utilizando un instrumento de prueba de tracción (por ejemplo, un Sintech MTS Tensile Tester, o un sistema de prueba de materiales INSTRON universal ) en una muestra de un material con forma de película entre aproximadamente 0,003" (76 micrómetros) y 0,004" (102 micrómetros) de espesor y aproximadamente 1,3 cm de ancho, con una longitud de calibre de 5,1 cm y una velocidad de prueba de 2,5 cm/min.

Descripción adicional de revestimientos primarios y secundarios adecuados se puede encontrar en la publicación PCT WO2005 / 010589.

45 Preferiblemente, las fibras ópticas descritas en este documento tienen un bajo contenido de OH, y preferiblemente tienen una curva de atenuación que presenta un pico de agua relativamente bajo, o ninguno en una región de longitud de onda particular, especialmente en el E-banda. La fibra óptica aquí descrita tiene preferiblemente una atenuación óptica (espectral) a 1383 nm que no es más de 0,10 dB / km por encima de una atenuación óptica a 1310 nm, y más preferiblemente no más que la atenuación óptica a 1310 nm. La fibra óptica descrita en el presente documento tiene preferiblemente un cambio de atenuación máximo inducido por hidrógeno menor que 0,03 dB/km a 1383 nm después de ser sometida a una atmósfera de hidrógeno, por ejemplo 0,01 atm de hidrógeno a presión parcial durante al menos 144 horas.

55 Un pico bajo de agua proporciona generalmente pérdidas por atenuación inferiores, especialmente para señales de transmisión entre aproximadamente 1340 nm y aproximadamente 1470 nm. Además, un pico de agua bajo también proporciona una eficiencia de bombeo mejorada de un dispositivo emisor de luz de bombeo que está acoplado ópticamente a la fibra óptica, tal como una bomba Raman o un amplificador Raman que puede funcionar en una o más longitudes de onda de bombeo. Preferiblemente, un amplificador Raman bombea a una o más longitudes de onda que son aproximadamente 100 nm más bajas que cualquier longitud de onda o región de longitud de onda

operativa deseada. Por ejemplo, una fibra óptica que lleva una señal de funcionamiento a una longitud de onda de alrededor de 1550 nm puede bombearse con un amplificador Raman a una longitud de onda de bombeo de alrededor de 1450 nm. Por tanto, la menor atenuación de la fibra en la región de longitud de onda de aproximadamente 1400 nm a aproximadamente 1500 nm tendería a disminuir la atenuación de la bomba y aumentar la eficiencia de la bomba, por ejemplo, ganancia por mW de potencia de la bomba, especialmente para longitudes de onda de la bomba alrededor de 1400 nm.

Las fibras descritas en el presente documento presentan valores bajos de PMD en particular cuando se fabrican con los procesos OVD. El hilado de la fibra óptica también puede reducir los valores de PMD para la fibra descrita en este documento.

**Ejemplos de cables**

La Tabla 5 muestra resultados modelados para diseños de cables de fibra óptica que tienen fibras descritas en este documento. Los ejemplos 1 y 2 no son parte de la invención y son solo para comparación. Los ejemplos 3-14 muestran ejemplos de realizaciones. Como se muestra en la tabla a continuación, estos ejemplos de realizaciones incluyen el diámetro del tubo de protección, el grosor de la pared del tubo de protección, el número de fibras ópticas en cada tubo de protección, el diámetro de la fibra óptica, incluidas las capas de recubrimiento y coloración, el número total de fibras ópticas en el cable, el número de tubos de protección en el cable, el diámetro mínimo del miembro central (incluidos los elementos de resistencia y el revestimiento), el diámetro mínimo del núcleo del cable, la densidad de la fibra en el núcleo del cable y el parámetro  $\Omega$  (diámetro de la fibra/diámetro interior del tubo de protección). Los cables de fibra óptica en estos ejemplos pueden incluir trenzado de los tubos de protección, trenzado de hilos de ligadura y / o ligadura de película delgada para sujetar los tubos de protección, elementos de resistencia adicionales fuera del núcleo del cable, blindaje y camisa del cable.

Tabla 5. Cables de fibra óptica

Parámetro	Ejemplo 1	Ejemplo 2	Ejemplo 3	Ejemplo 4	Ejemplo 5	Ejemplo 6	Ejemplo 7
Diámetro interior del tubo de protección, mm	0,92	0,77	0,89	0,89	0,84	0,84	0,84
Espesor del tubo de protección, mm	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,10	0,05
Número de fibras en el tubo de protección	8	8	12	12	12	12	12
Diámetro de fibra recubierta + coloreada, mm	0,25	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Recuento total de fibras en el cable	96	96	72	144	144	144	144
Tubos de protección en el cable	12	12	6	12	12	12	12
Diámetro mínimo del miembro central, mm	3,48	3,06	1,19	3,41	3,28	2,99	2,71
Diámetro mínimo del núcleo del cable, mm	5,92	5,20	3,57	5,79	5,56	5,07	4,59
Densidad de fibra en el núcleo del cable (N / mm <sup>2</sup> )	3,49	4,51	7,19	5,47	5,93	7,12	8,72
Omega	3,68	3,67	4,24	4,24	4,00	4,00	4,00

Tabla 5. Cables de fibra óptica (continuación)

Parámetro	Ejemplo 8	Ejemplo 9	Ejemplo 10	Ejemplo 11	Ejemplo 12	Ejemplo 13	Ejemplo 14
Diámetro interior del tubo de protección, mm	1,20	1,22	1,22	0,99	0,87	1,22	1,22
Espesor del tubo de protección, mm	0,15	0,15	0,10	0,10	0,15	0,15	0,15

## ES 2 889 949 T3

Número de fibras en el tubo de protección	24	24	24	24	24	24	24
Diámetro de fibra recubierta + coloreada, mm	0,21	0,21	0,21	0,17	0,15	0,21	0,21
Recuento total de fibras en el cable	144	144	144	144	144	288	288
Tubos de protección en el cable	6	6	6	6	6	12	12
Diámetro mínimo del miembro central, mm	1,50	1,53	1,43	1,19	0,88	4,37	4,37
Diámetro mínimo del núcleo del cable, mm	4,50	4,57	4,27	3,57	3,22	7,41	7,41
Densidad de fibra en el núcleo del cable (N / mm <sup>2</sup> )	9,05	8,77	10,04	14,36	17,64	6,67	6,67
Omega	5,71	5,81	5,81	5,82	5,80	5,81	5,81

5 Los ejemplos de cable en la Tabla 5 muestran cables que comprenden diámetros interiores del tubo de protección entre 0,75 a 1,25 mm, espesores de pared del tubo de protección de 0,05 a 0,15 mm, el número de fibras ópticas en cada tubo de protección de 8 a 24, el diámetro de la fibra óptica, incluidas las capas de recubrimiento y coloración, de 0,21 a 0,25 mm, el número total de fibras ópticas en el cable de 72 a 288, el número de tubos de protección en el cable de 6 a 12, el diámetro mínimo del miembro central, incluidos los elementos de resistencia y el revestimiento (p. ej., revestimiento de polímero en los elementos de resistencia) de 0,88 mm a 4,37 mm, el diámetro mínimo del núcleo del cable de 3,22 mm y 7,41 mm, la densidad de fibra en el núcleo del cable de 3,49 / mm<sup>2</sup> y 17,64 / mm<sup>2</sup>, y el parámetro  $\Omega$  (diámetro de la fibra / diámetro interior del tubo de protección) entre 3,67 y 5,81. Los ejemplos aquí muestran que el parámetro  $\Omega$  de relación de diámetro oscila entre  $2,25 + 0,143 (N) \leq \Omega \leq 1,14 + 0,313 (N)$  y en algunas realizaciones preferidas oscila entre  $2,25 + 0,143 (N) \leq \Omega \leq 2,66 + 0,134 (N)$ .

15 Se ha de entender que la descripción anterior es un ejemplo solamente y está destinada a proporcionar una visión general para la comprensión de la naturaleza y carácter de las fibras que se definen por las reivindicaciones. Los dibujos adjuntos se incluyen para proporcionar una mayor comprensión de las realizaciones y se incorporan y constituyen parte de esta especificación. Los dibujos ilustran diversas características y realizaciones que, junto con su descripción, sirven para explicar los principios y el funcionamiento. Resultará evidente para los expertos en la técnica que se pueden realizar diversas modificaciones a las realizaciones descritas en el presente documento sin apartarse del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

20 Si bien las realizaciones de cable específicas discutidas en este documento y mostradas en las figuras se refieren principalmente a cables que tienen una forma de sección transversal sustancialmente circular que define un orificio interno sustancialmente cilíndrico, en otras realizaciones, los cables discutidos en este documento pueden tener cualquier número de formas de sección transversales. Por ejemplo, en varias realizaciones, la camisa del cable 12 puede tener una forma de sección transversal ovalada, elíptica, cuadrada, rectangular, triangular o de otro tipo. En tales realizaciones, el paso o lumen del cable puede tener la misma forma o una forma diferente que la forma de la camisa del cable 12. En algunas realizaciones, la camisa del cable 12 puede definir más de un canal o pasaje. En tales realizaciones, los múltiples canales pueden ser del mismo tamaño y forma entre sí o pueden tener diferentes tamaños o formas.

30 A menos que se indique expresamente lo contrario, no es de ninguna manera la intención de que cualquier conjunto método en el presente documento se interpretará como que requiere que sus pasos pueden realizar en un orden específico. Por consiguiente, cuando una reivindicación de método no recita realmente una orden a seguir por sus pasos o no se establece específicamente de otra manera en las reivindicaciones o descripciones que los pasos deben limitarse a un orden específico, no se pretende en ningún caso inferir un orden determinado. Además, como se usa en el presente documento, el artículo "a" pretende incluir uno o más de un componente o elemento, y no pretende ser interpretado con el significado de solo uno.

40 Será evidente para los expertos en la técnica que diversas modificaciones y variaciones pueden hacerse sin apartarse del alcance de las realizaciones descritas. Dado que a los expertos en la técnica se les pueden ocurrir modificaciones, combinaciones, subcombinaciones y variaciones de las realizaciones descritas que incorporan la sustancia de las realizaciones, las realizaciones descritas deben interpretarse para incluir todo lo que esté dentro del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Un cable (10) de fibra óptica de baja pérdida por curvatura, densamente empaquetado, que comprende:
  - 5 una camisa exterior del cable (12);  
una pluralidad de tubos de protección (22) rodeados por la camisa del cable, cada tubo de protección (22) incluye una superficie interior (32) definir un canal que tiene un diámetro, D1, y una superficie exterior (34) que mira hacia una superficie interior de la camisa del cable; y
  - 10 una pluralidad, N, de fibras ópticas (20), ubicadas dentro del canal de cada tubo de protección y rodeadas por la superficie interior del tubo de protección, donde cada fibra óptica tiene un diámetro exterior, D2; donde las N fibras ópticas (20) están densamente empaquetadas dentro de cada tubo de protección (22) de manera que un parámetro  $\Omega$  de relación de diámetro, se define como la relación  $D1 / D2$ , y es  $2,25 + 0,143 (N) \leq \Omega \leq 1,14 + 0,313 (N)$ ;
  - 15 donde cada una de la pluralidad de fibras ópticas (20) comprende:  
  
un diámetro de campo modal superior a 9 micrómetros a 1310 nm;  
un corte de cable de menos de 1260 nm;  
una pérdida por macrocurvatura menor que 0,5 dB/vuelta a 1550 nm para un diámetro de mandril de 15 mm;
  - 20 donde las N fibras ópticas (20) están dispuestas en un grupo exterior (38) y un grupo interior (40) dentro de cada tubo de protección (22), donde el grupo exterior (38) comprende una pluralidad de fibras ópticas y el grupo interior comprende al menos dos fibras ópticas, donde las fibras ópticas del grupo exterior y del grupo interior están empaquetadas dentro del tubo de protección de modo que una longitud de separación máxima medida entre cualquier par de fibras ópticas adyacentes del grupo exterior sea menor que D2, de modo que al menos dos fibras
  - 25 ópticas del grupo interior están bloqueadas para que no se muevan desde el grupo interior al grupo exterior dentro del tubo de protección; caracterizado porque cada tubo de protección (22) está formado por un material polimérico relativamente rígido que tiene un módulo de elasticidad a 25 ° C entre 0,8 GPa y 3 GPa.
2. El cable de fibra óptica de la reivindicación 1, donde cada una de la pluralidad de fibras ópticas (20) comprende además un diámetro exterior menor que 210 micrómetros.
3. El cable de fibra óptica de las reivindicaciones 1 o 2, donde la pluralidad de tubos de protección (22) es al menos cuatro, y donde la pluralidad N de fibras ópticas (20) dentro de cada tubo de protección es al menos cuatro.
- 35 4. El cable de fibra óptica de la reivindicación 3, donde la pluralidad N de fibras ópticas (20) dentro de cada tubo de protección (22) es 12, donde la camisa exterior del cable (12) tiene un diámetro exterior inferior a 15 mm, y el diámetro exterior de cada fibra óptica es inferior a 210 micrómetros.
- 40 5. El cable de fibra óptica de la reivindicación 1, donde N es mayor que 6.
6. El cable de fibra óptica de la reivindicación 5, donde las N fibras ópticas están empaquetadas densamente dentro de cada tubo de protección de manera que  $\Omega \leq 2,66 + 0,134(N)$ .
- 45 7. El cable de fibra óptica de la reivindicación 1, donde N es mayor que 24.
8. El cable de fibra óptica de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, donde cada tubo de protección (22) tiene un grosor de pared entre 50 micrómetros y 250 micrómetros.
- 50 9. El cable de fibra óptica de las reivindicaciones 1 a 8, donde un círculo que circunscribe la pluralidad N de fibras ópticas tiene un diámetro D4, donde la relación  $D4 / D1$  es mayor que 0,95.
10. El cable de fibra óptica de la reivindicación 1, donde cada una de la pluralidad N de fibras ópticas (20) está recubierta con recubrimientos primarios y secundarios, donde el diámetro exterior del recubrimiento secundario es inferior a 210 micrómetros, donde el módulo de elasticidad del el revestimiento primario es inferior a 0,5 MPa y el módulo de elasticidad del revestimiento secundario es superior a 1200 MPa, de manera que la carga de perforación del revestimiento del revestimiento primario y secundario es superior a 25 g.
- 55

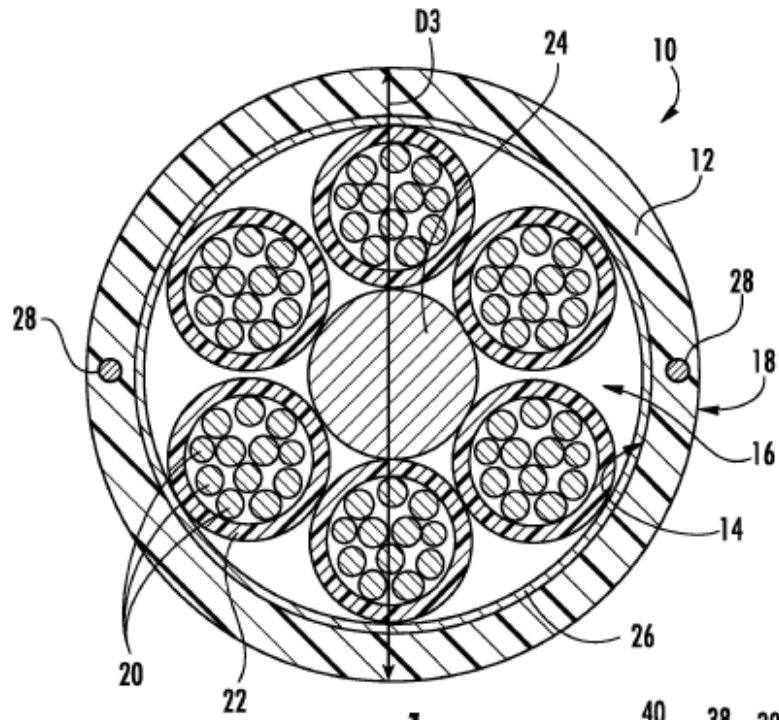


FIG. 1

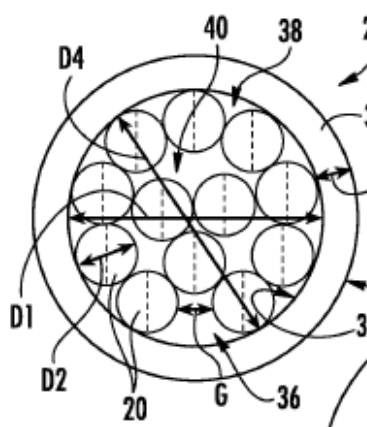


FIG. 2A

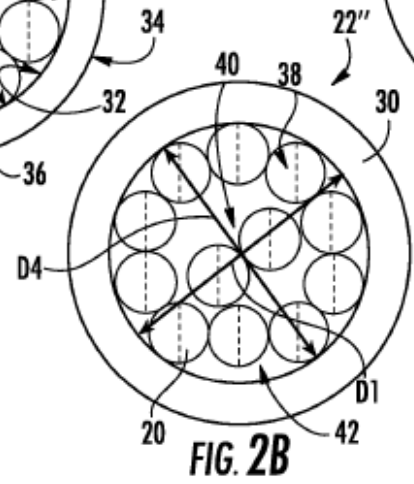


FIG. 2B

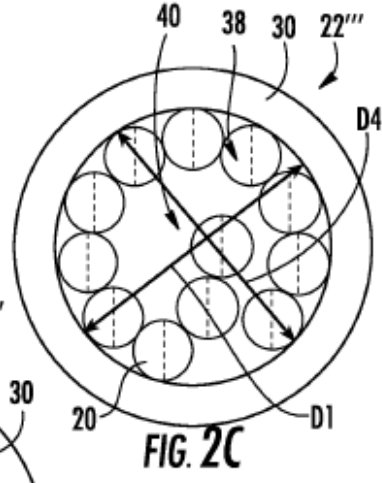


FIG. 2C

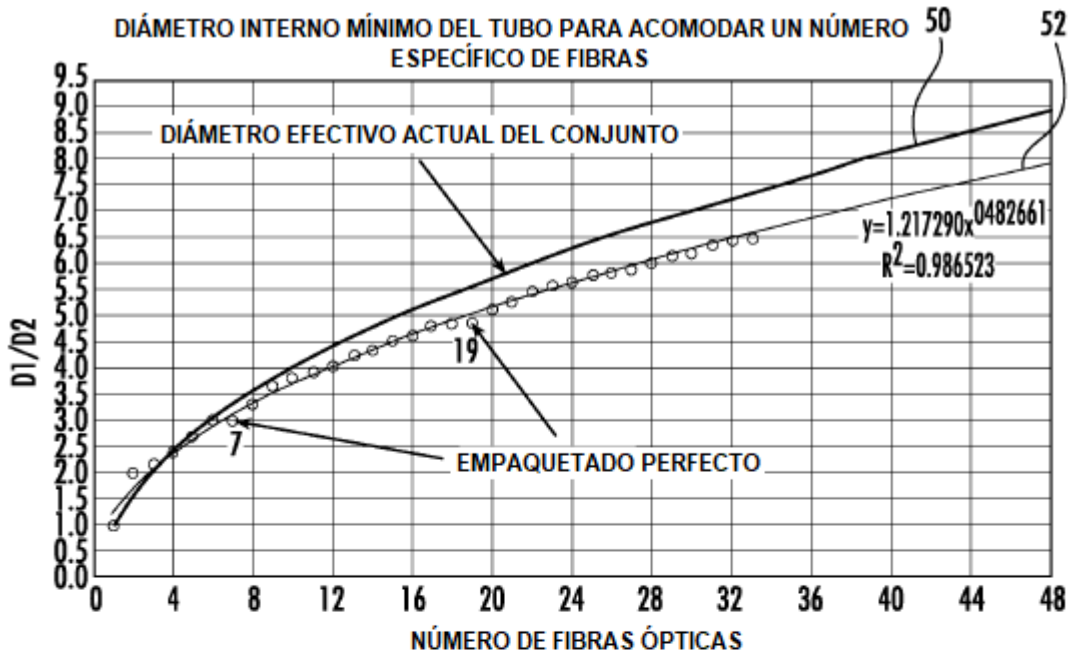


FIG. 3

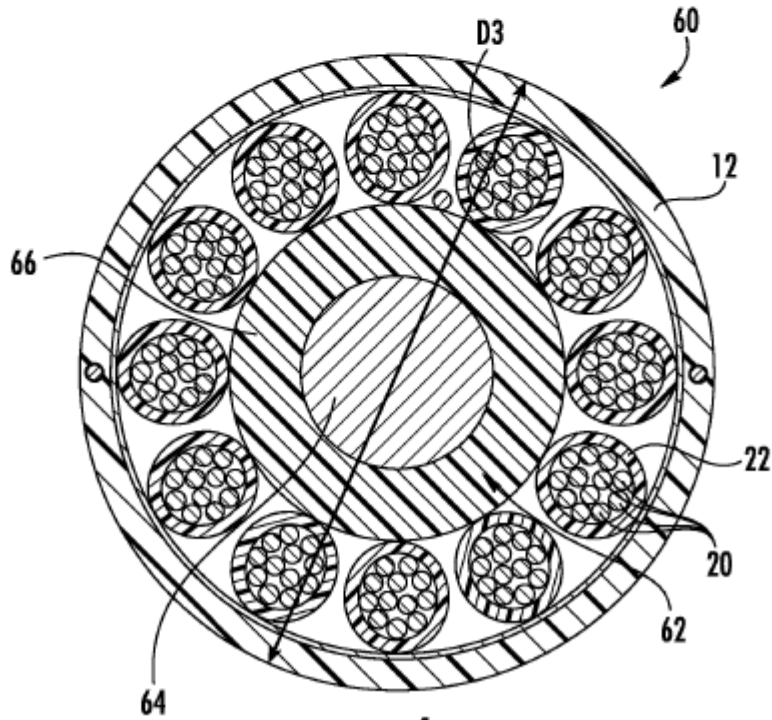


FIG. 4

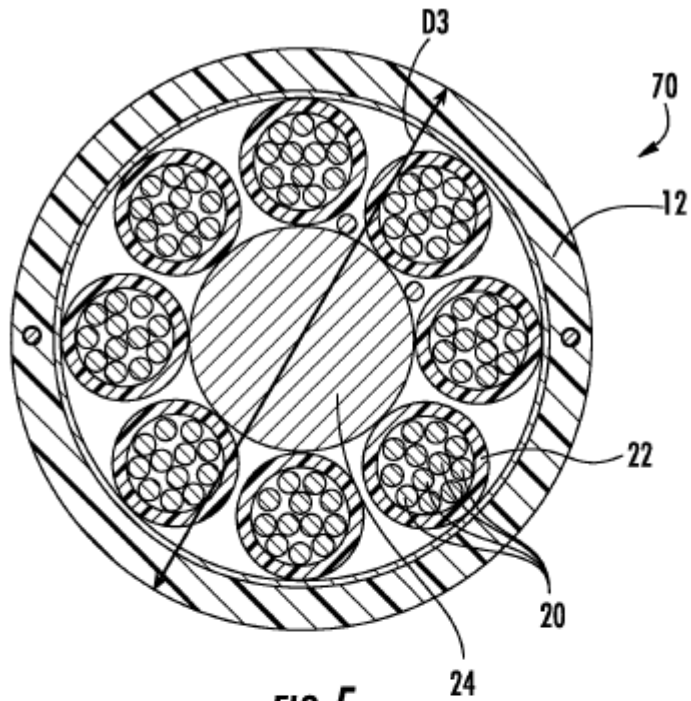


FIG. 5

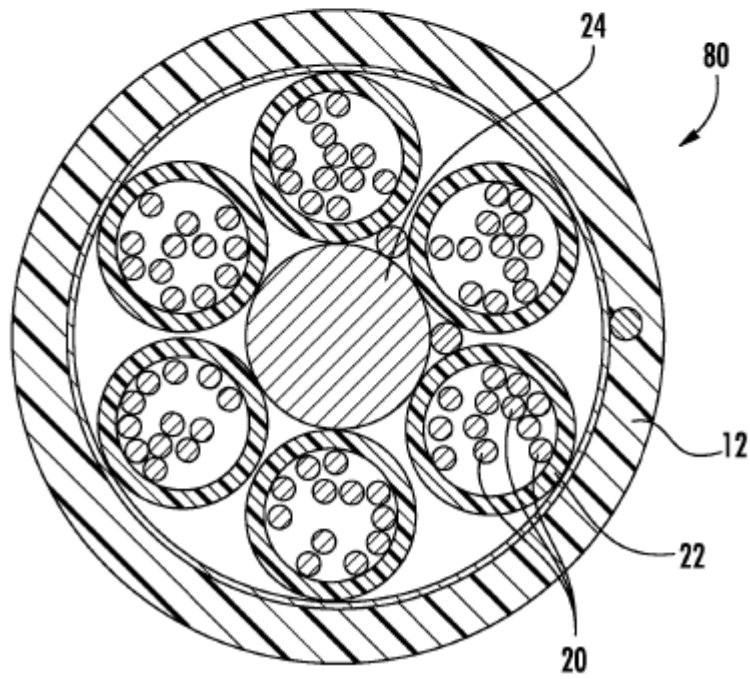


FIG. 6

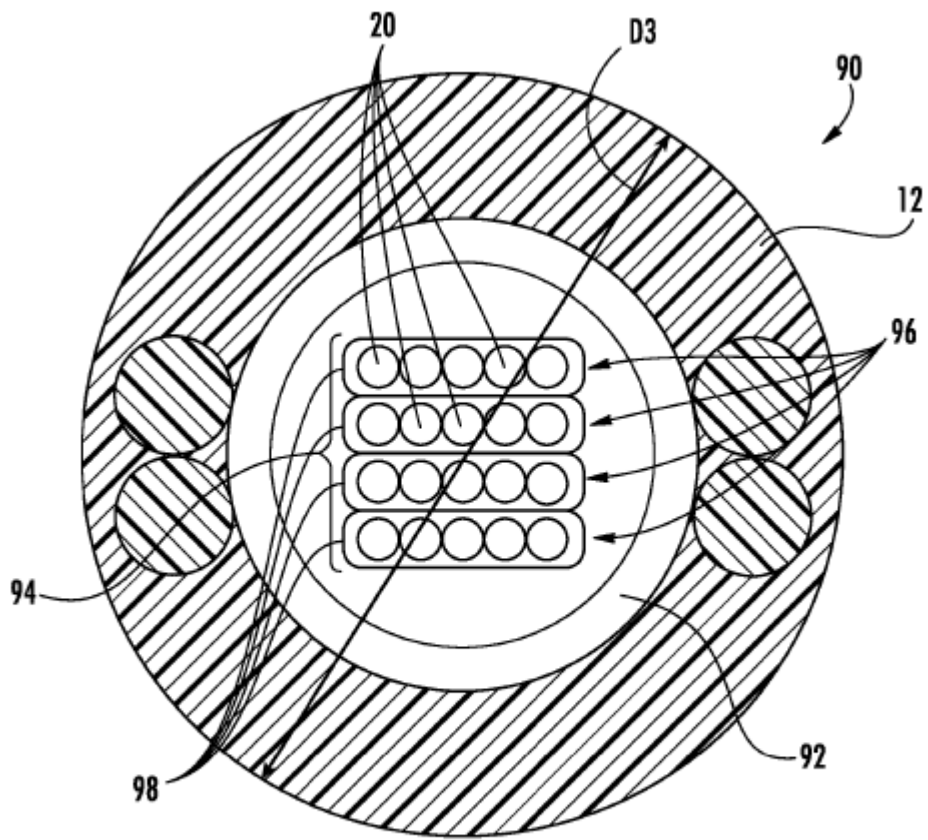


FIG. 7

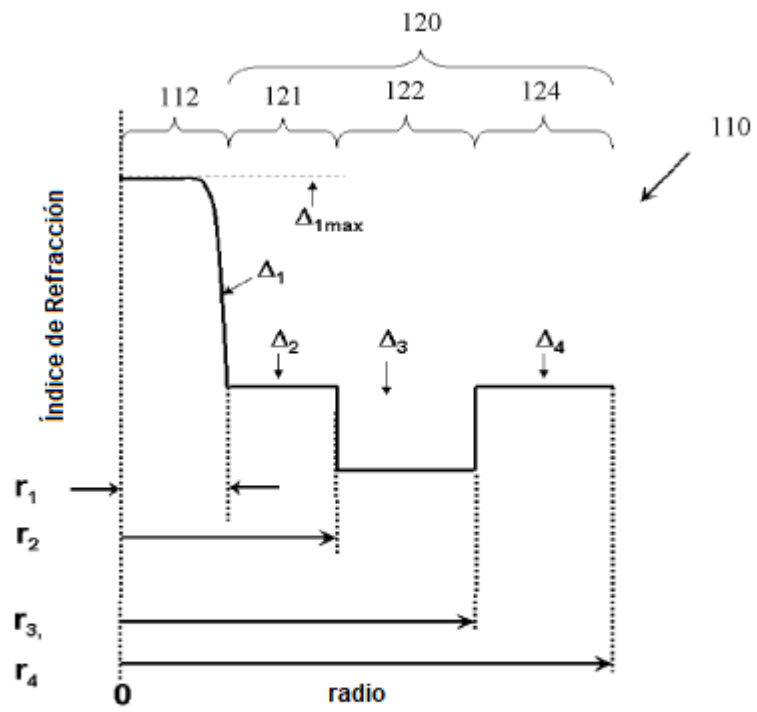


FIG. 8

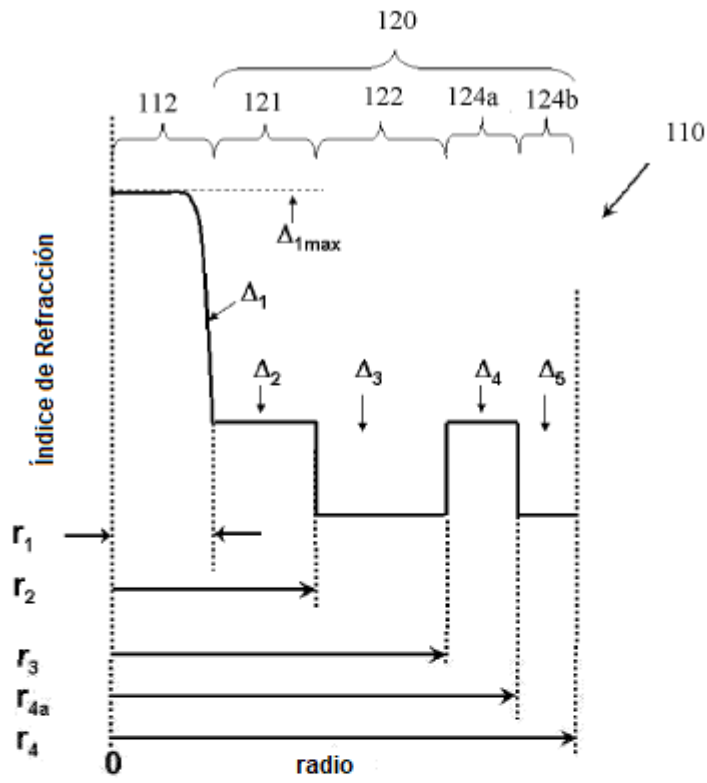


FIG. 9

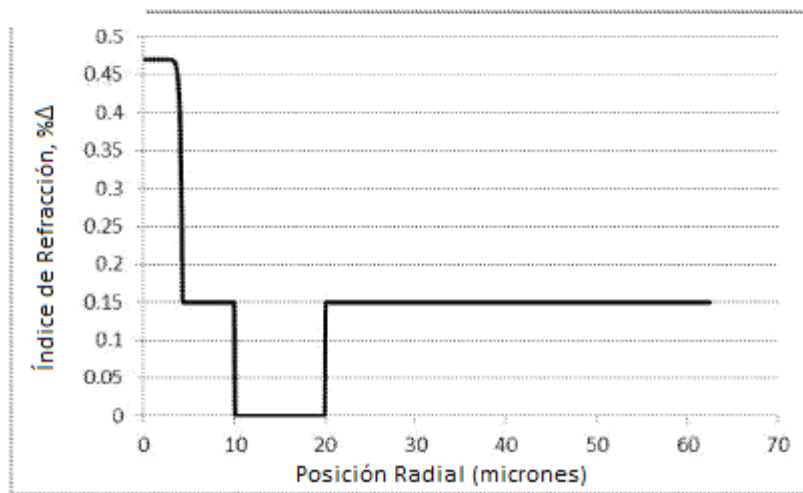


FIG. 10

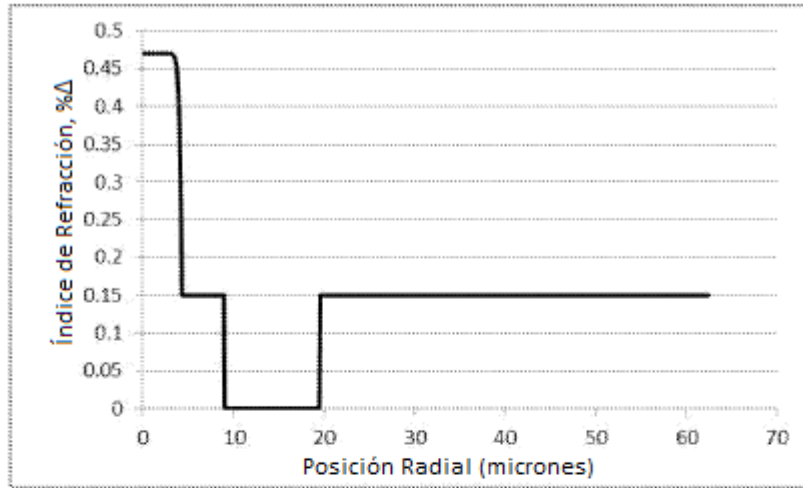


FIG. 11

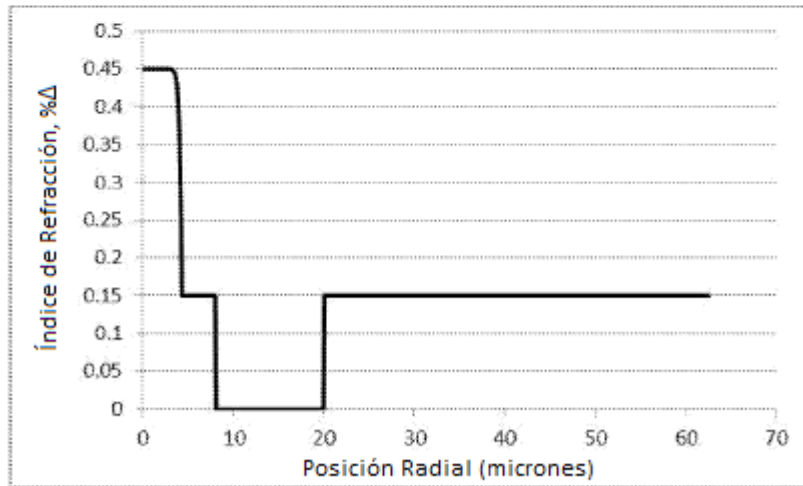


FIG. 12

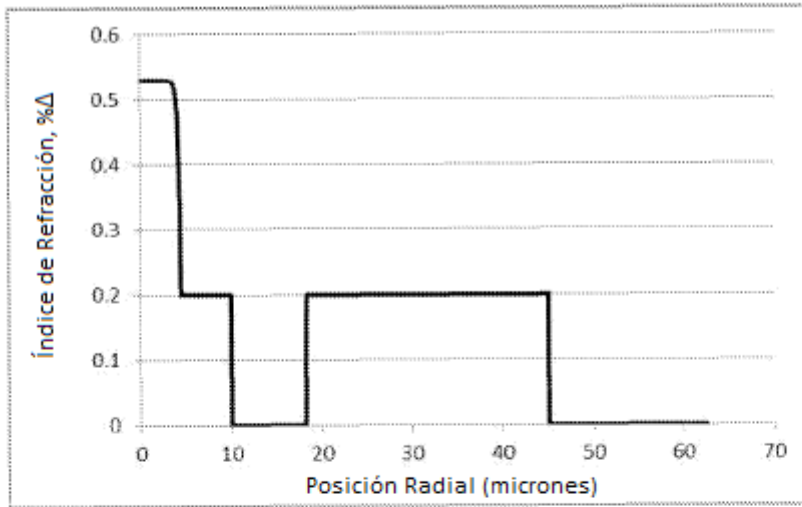


FIG. 13

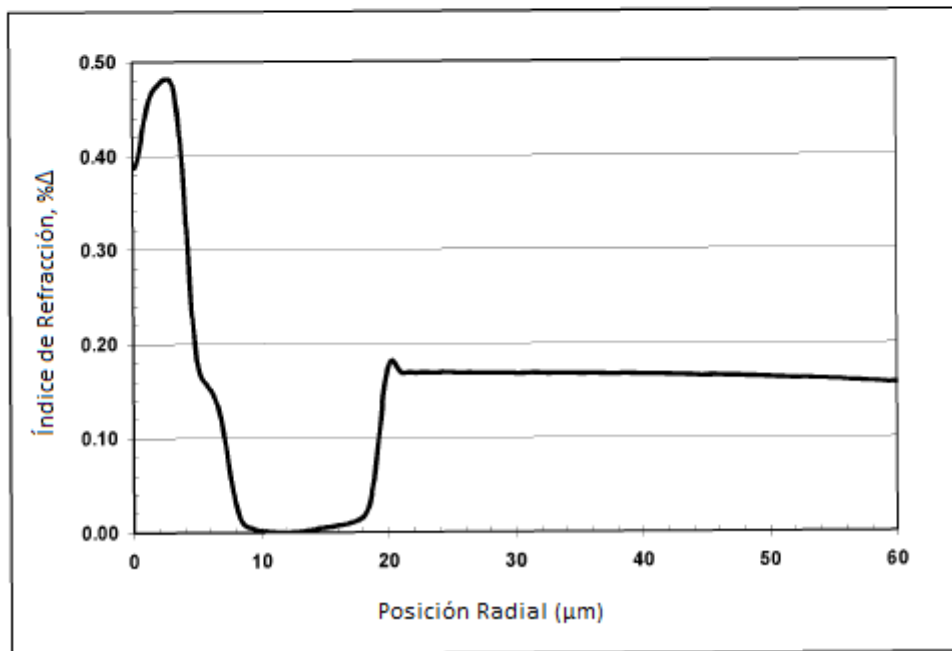


FIG. 14